

Санкт-Петербургский государственный университет

КАРПЕНКО Александр Александрович

Выпускная квалификационная работа

Оптимизация транспортной системы снабжения сжиженным природным газом г. Мурманск с использованием морского транспорта

Уровень образования:

Направление 01.04.02 «Прикладная математика и информатика»

Основная образовательная программа ВМ.5504.2018 «Исследование операций и системный анализ»

Научный руководитель:
кафедра ММЭС
д.ф.-м.н., профессор
Крылатов Александр Юревич

Рецензент: заведующий
отделом развития морского
транспорта, АО «ЦНИИМФ»,
к.т.н., Мудрова Ольга
Михайловна

Санкт-Петербург
2020

Содержание

Введение	4
Постановка задачи	9
Основные требования и исходные данные к системе газоснабжения г. Мурманск	9
Математическая постановка задачи	13
Постановка задачи в сфере управления запасами	13
Постановка задачи в сфере имитационного моделирования	14
Постановка задачи моделирования ветро-волнового режима районов плавания газозовов	15
Постановка оптимизационной задачи	18
Обзор литературы	20
Глава 1. Построение моделей временных рядов ветро-волнового режима	38
1.1. Моделирование одномерных временных рядов атмосферного давления	38
1.2. Моделирование многомерных временных рядов гидрометеорологических условий	43
1.2.1. Моделирование векторной скорости ветра	43
1.2.2. Моделирование параметров ветровых волн	46
Глава 2. Построение имитационной модели транспортной системы газоснабжения г. Мурманск	52
2.1. Инициализация массива исходных данных и функционала	52
2.1.1. Множества (массивы) исходных данных и временных переменных	52
2.1.2. Функционал модели	54
2.2. Построение имитационной модели снабжения плавучего хранилища газа	58
2.2.1. Дискретно-событийное моделирование портового комплекса	59
2.2.2. Построение геоинформационной среды модели	60
2.2.3. Агентное моделирование эксплуатации газозовов	61
2.2.4. Имитационное моделирование ветро-волнового режима рассматриваемых регионов	64

2.2.5. Общий вид работы имитационной модели	65
2.3. Оптимизация морской транспортной системы снабжения сжиженным природным газом г. Мурманск	69
Выводы	73
Заключение	75
Список литературы	76

Введение

Ранние этапы развития человечества характеризовались решением огромного множества задач, среди которых можно выделить кластер проблем, связанных с перемещением людей и груза на расстояния различной протяженности. Естественно, по мере формирования общества и развития цивилизационных отношений становились доступными и усовершенствованными многие подходы к решению транспортных задач. С одной стороны, транспортные средства, складские комплексы, средства коммуникации и связи становились более эффективными и доступными в виду движения научно-технического прогресса.

С другой стороны, отдельно рассматриваемый научный прогресс привел к созданию целого комплекса приложения математического аппарата к решению проблем, связанных с транспортировкой груза и пассажиров.

Так, в 1781 г. применение инструментов линейного программирования к нахождению минимальных затрат на перевозки выделило целый класс задач, решение которых находится по методу минимального элемента (термин введен Гаспаром Монжем [22]). Далее, спустя несколько столетий, в 1942 г. Леонидом Канторовичем был разработан метод решения транспортных задач, направленный на нахождение оптимального плана перевозок однородного продукта из однородных пунктов производства в однородные пункты потребления. С тех пор решением транспортных задач занимались многие математики. В 1951 г. был разработан метод северо-западного угла Дж.Б. Данцига, в конце 1950-х гг. – метод дифференциальных рент советских ученых А.Л. Лурье и А.Л. Бруднова, в 1960 г. – метод аппроксимации Р. Фогеля, в 1978 г. – отдельные руководства к решению транспортных задач А.В. Кузнецова.

Предложенные методы оптимизации транспортных систем различных целеполаганий имели существенные ограничения в учете воздействия на исследуемый объект огромного числа динамически меняющихся внутренних и внешних факторов, в т.ч. содержащих стохастическую компоненту. Одним из способов преодоления данных ограничений является проведение экспериментов

над исследуемым объектом для получение всей необходимой информации. Однако в большинстве случаев эксперименты над реальными объектами сопровождаются либо колоссальными и не оправдывающими себя затратами, либо высокими рисками для безопасности жизни исследователей. Поэтому в конце XX века экспериментальные методы исследования фокусировались на логико-математической модели исследуемого объекта с применением аналитических и численных методов решения, а применяемый метод математического моделирования стали называть имитационным (simulation modeling – от англ. имитационное моделирование, моделирование основанное на симуляции). Первой задачей имитационного моделирования являлась задача перевозки нефти и нефтепродуктов танкерами [26]. Основной интерес исследователей заключался в учете сложного порядка работы нефтеналивного терминала (внутренних факторов воздействия на работу флота) и в учете погодных условий в районе эксплуатации танкеров (внешних факторов). Данный факт подтверждает неподдельный исследовательский интерес со стороны математического сообщества логистикой морского транспорта.

Актуальность настоящего исследования заключается в следующем. Суда морского транспорта являются высокотехнологичными и дорогостоящими технологическими сооружениями, которые используются в крупных проектах различного назначения. Эксплуатация судов морского транспорта сопровождается высокими затратами, величина которых зависит от продолжительности и структуры времени рейса. На величину эксплуатационных затрат судов морского транспорта оказывают влияния различные внутренние и внешние факторы, учет которых с помощью аналитического моделирования является задачей с высокой (иногда неоправданной) трудоемкостью и низкой гибкостью реализации относительно различных исходных данных проекта. В данном случае применение средств имитационного моделирования позволяет построить логико-математическую модель исследуемого объекта, позволяющую в ходе экспериментов над ней

получить необходимую исследователю информацию о возможностях по снижению затрат на реализацию рассматриваемого проекта.

Целью выпускной квалификационной работы является оптимизация проекта морской составляющей транспортной системы снабжения г. Мурманск сжиженным природным газом посредством построения и использования компьютерной имитационной модели.

Задачами выпускной квалификационной работы являются:

- 1) формулировка критерия качества, представляющего собой совокупные затраты на реализацию проекта транспортной системы газоснабжения г. Мурманск и Мурманской области в части морского транспорта;
- 2) разработка алгоритма и построение модели снабжения хранилища газа;
- 3) разработка алгоритма и моделирование эксплуатации судна;
- 4) построение моделей ветро-волнового режима рассматриваемых морских участков на основе результатов анализа временных рядов погодных условий;
- 5) интеграция разработанных алгоритмов и моделей в комплексную имитационную транспортную модель;
- 6) верификация компьютерной имитационной транспортной модели на основе результатов технико-экономического обоснования [49] затрат на обеспечение транспортной системы снабжения сжиженным природным газом г. Мурманск [53].
- 7) проведение оптимизационного эксперимента на основе комплексной имитационной транспортной модели;

Процесс разработки подхода к созданию имитационной транспортной модели освещен в научных публикациях автора [30], в докладах в рамках участия в Международной научно-практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы – 2019» [32], а также в ходе проведения научно-технического совета АО «ЦНИИМФ» [48].

Объектом исследования является морская составляющая транспортной системы газоснабжения г. Мурманск. Предметом исследования является имитационное моделирование с использованием средств теории управления запасами, теории систем массового обслуживания и анализа временных рядов.

Работа состоит из 4 разделов, содержит 4 таблицы, 19 рисунков, объем работы составляет 82 страницы.

Для понимания основной части работы ниже будут приведены основные понятия, используемые при описании работы [4].

Бункер – рейсовый запас топлива, воды и моторных масел на судне.

Рейс – законченный процесс перевозки грузов или пассажиров за определенный промежуток времени между географическими пунктами или районами. В т.ч. круговой рейс – рейс между двумя или несколькими портами, при котором судно возвращается в первоначальный порт отправления.

Бункеровка – загрузка транспортных средств топливом, водой и моторными маслами.

Газовоз – судно для перевозки сжиженного газа в цистернах.

Сжиженный природный газ (СПГ) – природный газ, очищенный от примесей и искусственно сжиженный путем охлаждения до $-160,4^{\circ}\text{C}$ для удобства хранения и транспортировки.

Дедвейт – максимальная масса груза и всех необходимых судовых запасов (топлива, воды, снабжения), которую судно может принять при его погружении по допустимую летнюю грузовую марку в морской воде.

Капитальные расходы – расходы, понесенные предприятием в результате приобретения или модернизации физических активов (в данной работе под физическим активом подразумевается судно). Операционные расходы – повседневные затраты предприятия для ведения бизнеса, для судоходных предприятий – расходы, понесенные предприятием при осуществлении перевозок грузов и пассажиров.

Причал – совокупность сооружений и устройств для стоянки и обслуживания судов, посадки и высадки пассажиров, грузовых операций и т.п.

Рейд – участки акватории, защищенные от сильного волнения, где суда могут стоять на якорях в ожидании разрешения на подход к причалам или на выход из порта.

Швартовка – подтягивание и удержание судна во время стоянки у причала или у борта другого судна с помощью совокупности устройств и приспособлений.

Эксплуатационная скорость хода судна – средняя скорость судна за время эксплуатации внутри одного рейса.

Эксплуатационные расходы по судну – укрупненные статьи затрат по эксплуатации судна, из которых в настоящей работе будут рассматриваться только расходы на содержание экипажа судна и расходы на топливо и смазочные материалы.

Вводятся понятия:

- 1) технологическая схема – пара, состоящая из используемых типа газовоза и типа плавучего хранилища газа;
- 2) технологическая линия – совокупность технологической схемы и выбранного маршрута поставок.

Постановка задачи

Основные требования и исходные данные к системе газоснабжения г. Мурманск

Задачей реализуемого проекта является обоснование или выбор оптимальной (по критерию минимума совокупных затрат на его реализацию) проектируемой транспортной системы поставок на проектируемый терминал для приема, хранения и регазификации СПГ в Мурманской области, предназначенный для обеспечения надежного круглогодичного снабжения газом, как всех котельных ПАО «Мурманская ТЭЦ», так и иных (перспективных) потребителей г. Мурманск и Мурманской области. В данной работе рассматривается следующий порядок автономного газоснабжения объектов города Мурманск и Мурманской области.

На берегу Кольского залива в районе г. Мурманск будет установлено плавучее хранилище газа с регазификационной установкой. СПГ в хранилище будет доставляться газовозами из различных отправных точек. В качестве расчетных отправных точек были выбраны:

- 1) Порт Выборг, на территории которого планируется реализация проекта СПГ КС «Портовая» ООО «Газпром СПГ Портовая» [57];
- 2) Порт Высоцк, на территории которого располагается СПГ-проект Криогаз – Высоцк компаний ООО «Криогаз Высоцк» и ПАО «Новатэк» [59];
- 3) порт Усть-Луга, на территории которого планируется реализация крупного СПГ-проекта «Балтийский СПГ» компании ПАО «Газпром» [58];
- 4) о.Кильдин, на котором может быть организован перевалочный пункт СПГ поставок из Норвегии компанией ПАО «Новатэк» [52];
- 5) губа Ура, на территории которой планируется размещение СПГ терминала компанией ПАО «Новатэк» [51].

Расчетные маршруты транспортировки СПГ показаны на рисунках 1-3.



Рисунок 1 – Маршрут транспортировки Выборг/Высоцк - Мурманск

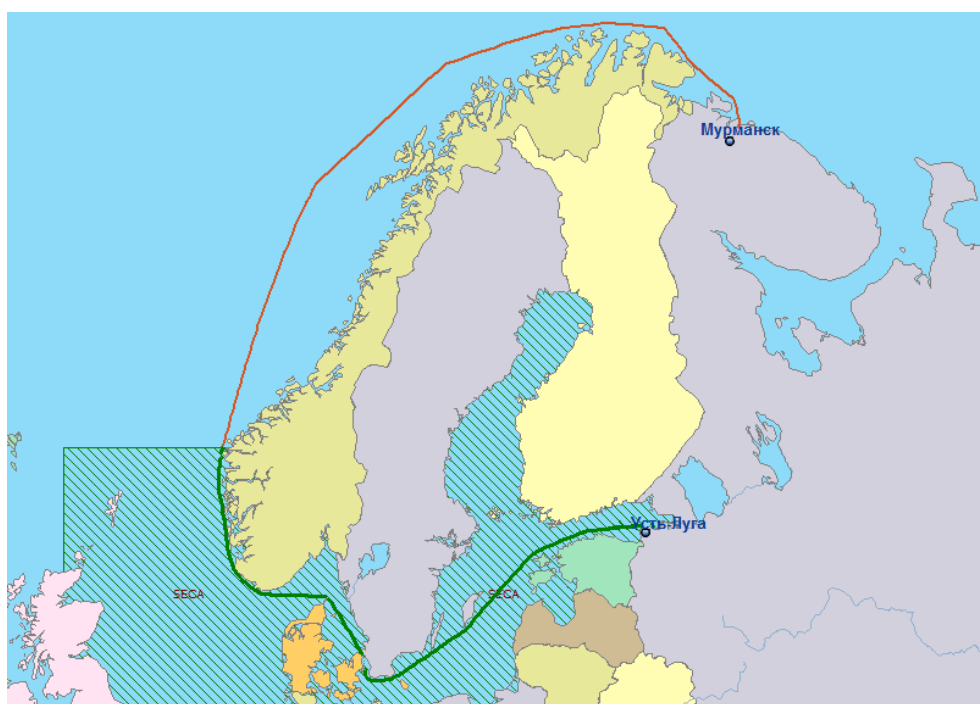


Рисунок 2 – Маршрут транспортировки Усть-Луга - Мурманск



Рисунок 3 – Маршрут транспортировки о.Кильдин/губа Ура – Мурманск

Маршруты следования газовозов проходят по Балтийскому, Северному, Норвежскому и Баренцеву морям. Ледокольная проводка судов в данной работе имитируется путем замедления скорости газовозов в портовых районах. Так, средняя эксплуатационная скорость судов на территории ледокольной проводки (50 м.миль от акватории портов Выборг/Высоцк, Усть-Луга) будет составлять 8 узлов.

Цель работы компьютерной имитационной модели морской составляющей транспортной системы газоснабжения – найти оптимальный вариант технологической линии, минимизирующий операционные и капитальные затраты по транспортному обеспечению системы газификации г. Мурманска СПГ с использованием морского транспорта при учете всех требований проекта, а также погодных условий районов эксплуатации флота.

К проекту транспортной системы газоснабжения предъявлены следующие требования:

- 1) обеспечивать необходимый объем потребления газа, меняющийся ежемесячно – дефицит газа при снабжении рассматриваемых потребителей г. Мурманск считается недопустимым;

2) учитывать различие в потреблении СПГ котельными ПАО «Мурманская ТЭЦ» и иными (перспективными) потребителями г. Мурманск и Мурманской области;

3) соблюдать неснижаемый запас СПГ в ПлХГ, уровень которого зависит от максимального суточного объема потребления, а также от вместимости ПлХГ – данное требование обеспечивает поддержание СПГ в ПлХГ в захлаженном состоянии (при температуре $-160, 4^{\circ}\text{C}$);

4) доставка СПГ в г. Мурманск газозовами должна осуществляться по мере необходимости, но не реже, чем 1 раз в месяц – при длительном хранении СПГ в ПлХГ (более 1 месяца) происходит изменение физико-химических свойств СПГ, в связи с чем необходимо добавлять новый газ для «обновления» СПГ.

Погодные явления районов эксплуатации газозовов характеризуются ветро-волновыми режимами морских участков. Скорость судна при прохождении данных участков будет зависеть от высоты волн и курсового угла их бега [9], оказывая влияние на продолжительность рейса, расписание эксплуатации флота и, в конечном итоге, на потребность транспортной системы газоснабжения в газозовах.

По результатам технико-экономического обоснования [49] были получены следующие варианты технологической схемы морской составляющей транспортной системы, реализация которых должна быть симитирована в компьютерной имитационной модели:

1) для снабжения всех котельных ПАО «Мурманская ТЭЦ»:

а) газозов вместимостью $7\,350\text{ м}^3$, плавучее хранилище сжиженного газа вместимостью $22\,635\text{ м}^3$;

б) газозов вместимостью $17\,640\text{ м}^3$, плавучее хранилище сжиженного газа вместимостью $30\,422\text{ м}^3$;

с) газозов вместимостью $22\,635\text{ м}^3$, плавучее хранилище сжиженного газа вместимостью $44\,100\text{ м}^3$;

2) Для снабжения ПАО «Мурманская ТЭЦ» и иных (перспективных) потребителей г. Мурманск и Мурманской области:

а) газовоз вместимостью $7\,350\text{ м}^3$, плавучее хранилище сжиженного газа вместимостью $44\,100\text{ м}^3$;

б) газовоз вместимостью $17\,640\text{ м}^3$, плавучее хранилище сжиженного газа вместимостью $64\,500\text{ м}^3$;

с) газовоз вместимостью $22\,635\text{ м}^3$, плавучее хранилище сжиженного газа вместимостью $64\,500\text{ м}^3$.

Математическая постановка задачи

Постановка задачи в сфере управления запасами

Рассмотрим процесс поставки товара на склад ограниченной вместимости (Cap_{st}) при условии неснижаемого остатка и ежемесячного обновления ($t_{\text{крит}}$) (рисунок 4) [5]. Ось абсцисс – ось времени (t , ч), ось ординат – ось количества товара, в нашем случае – ось объема СПГ в хранилище (ПлХГ) (x , м^3). Величина спроса – тангенс угла наклона линии потребления СПГ в ПлХГ ($\text{tg}\alpha$) – меняется во времени согласно таблице значений.

Поставка СПГ осуществляется газовозами одинаковой фиксированной грузовместимости через неизвестные промежутки времени. Каждый газовоз должен прибыть к ПлХГ в г. Мурманск:

1) либо в момент достижения неснижаемого уровня СПГ в ПлХГ за вычетом времени на выгрузку СПГ;

2) либо через месяц после последней заправки СПГ в ПлХГ.

Планирование промежутков времени между отправлениями зависит от продолжительности потребления СПГ в ПлХГ до неснижаемого уровня. В связи с этим возможны три случая определения продолжительности времени потребления СПГ в зависимости от изменения величины спроса. Так, неснижаемый уровень СПГ в ПлХГ может быть достигнут:

1) при неизменном значении спроса (момент t_1 , угол наклона α_1);

2) при единожды меняющемся спросе (момент t_{\blacktriangle}) в сторону:

а) увеличения, тогда продолжительность потребления уменьшается (момент t_2 , угол наклона α_2);

б) уменьшения, тогда продолжительность потребления увеличивается (момент t_3 , угол наклона α_3);

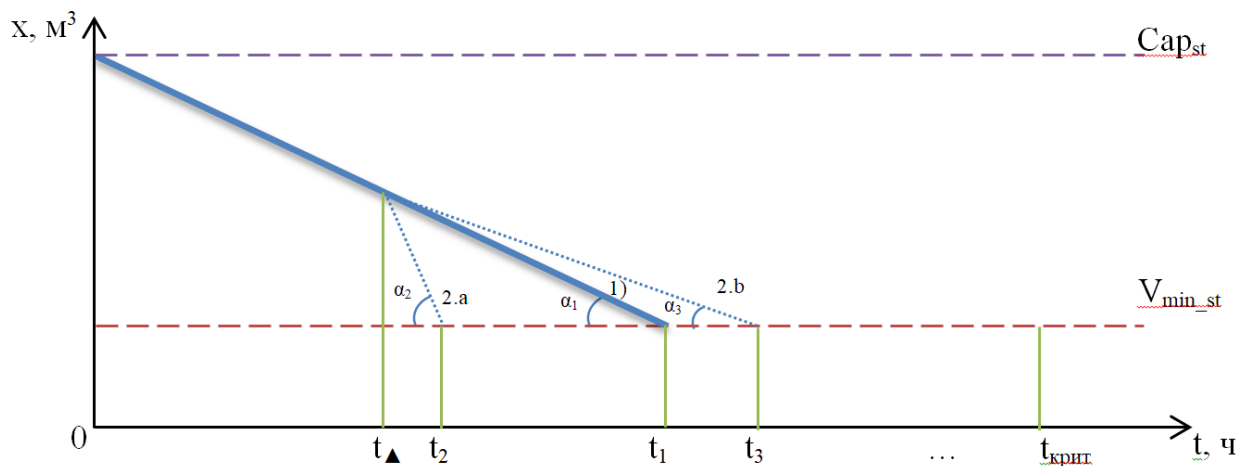


Рисунок 4 – Схема определения продолжительности потребления СПГ до неснижаемого уровня

Постановка задачи в сфере имитационного моделирования

Необходимо провести симуляцию транспортного процесса со следующими объектами:

1) Транспортные средства – газовозы СПГ, работающие на линиях поставок, имеющие следующие характеристики:

- а) эксплуатационная скорость, узлов;
- б) грузовместимость, м^3 ;
- с) кол-во насосов (ед) и их производительность ($\text{м}^3/\text{ч}$);
- д) продолжительность времени на формальности в портах, ч.;
- е) длина судна, м.;
- ф) направление хода, град.

2) Хранилище СПГ – плавучее хранилище газа ПлХГ-ХХ, имеющее следующие характеристики:

- а) вместимость, м^3 ;
- б) неснижаемый уровень СПГ, м^3 ;
- с) продолжительность критического периода обновления СПГ, ч.

3) Мировой океан – среда функционирования объектов из п.1 и п.2, имеющая следующие характеристики:

а) массив районов плавания, каждый из которых характеризуется:

i) площадью, м^2 ;

ii) протяженностью участка морского маршрута транспортной системы снабжения, который проходит на территории данного района, м.миль;

iii) особым ветро-волновым режимом, оказывающим непосредственное влияние на эксплуатационные показатели работы флота;

4) Потребитель – формальное представление реальных потребителей в виде функции потребления, заданной таблицей значений в зависимости от модельного месяца.

Постановка задачи моделирования ветро-волнового режима районов плавания газозовов

Необходимо смоделировать динамическую среду функционирования газозовов, характеризующуюся (но не ограничиваемую) такими параметрами, как высота волны (м), направление бега волн (град.), скорость ветра (м/с) и направление ветра (град.) для каждого из районов плавания [3], [4]:

1) Балтийское море (7 районов);

2) Северное море (маршрут пролегает в 2 из 3 районов);

3) Норвежское море (маршрут пролегает в 2 из 2 районов);

4) Баренцево море (маршрут пролегает в 2 из 4 районов);

Таким образом, максимальная мощность множества морских участков, на территории которых может пролегать маршрут следования газозовов, составляет 13 единиц. Каждый из рассматриваемых морских участков имеет уникальный ветро-волновой режим. Наравне с построением физических моделей динамики гидрометеорологических параметров в исследовательской деятельности имеет место исследование временных рядов рассматриваемых параметров и построение моделей временных рядов [17], [18]. В совокупности с

физической сущностью каждого из природных явлений построенные модели будут иметь высокую надежность и состоятельные оценки коэффициентов в модели. Основными физическими явлениями, рассматриваемыми в данной работе, являются:

1) Глобальная циркуляция атмосферы – представлена движением воздушных масс над поверхностью земного шара в следствие вращения земли вокруг своей оси, а также величиной атмосферного давления в зависимости от долготы исследуемой местности (рисунок 5). Также следует обратить внимание на систему постоянных ветров, которая является следствием глобальной циркуляции атмосферы [12].

2) Глобальная циркуляция вод мирового океана (рисунок 6) – тесно связана с глобальной циркуляцией атмосферы, а также вызвана под воздействием ряда прочих внешних факторов (притяжением луны и солнца, эндогенными процессами литосферных плит и др.) [12].

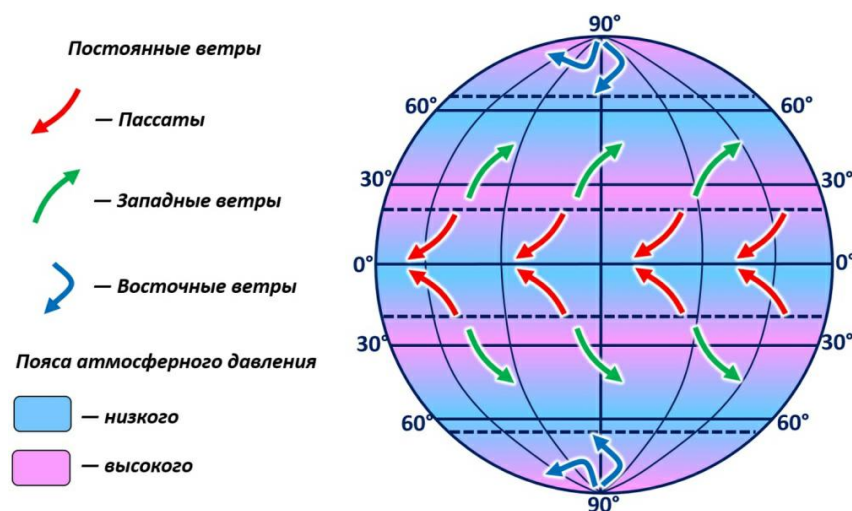


Рисунок 5 – Схема глобальной циркуляции атмосферы

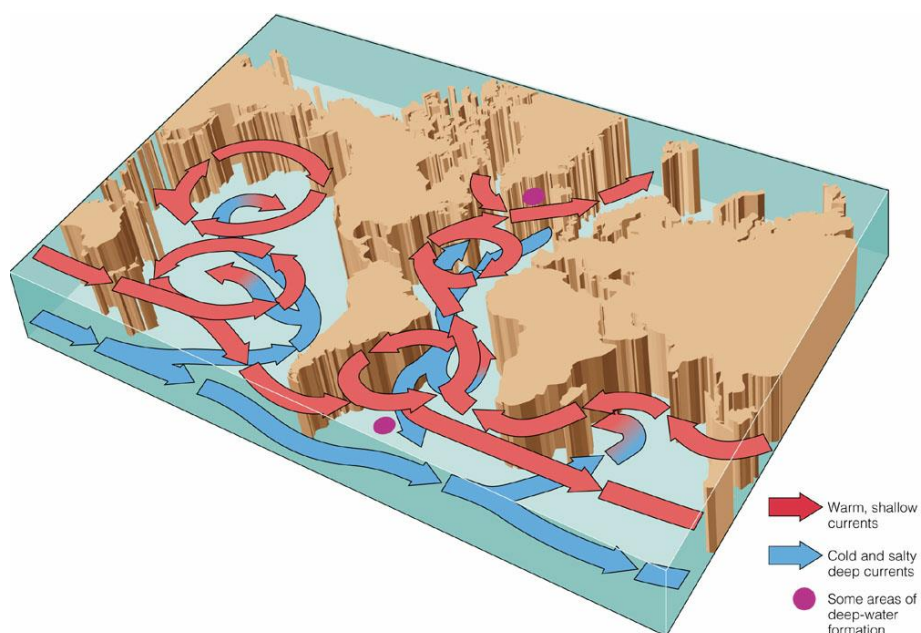


Рисунок 6 – Схема глобальной циркуляции вод Мирового океана

В соответствии с данными явлениями (рисунок 5, 6) были определены основные векторы возникновения и воздействия условий гидрометеорологии между морскими участками друг на друга. Расположение данных векторов были поставлены в соответствие расположению морских участков (рисунок 7).

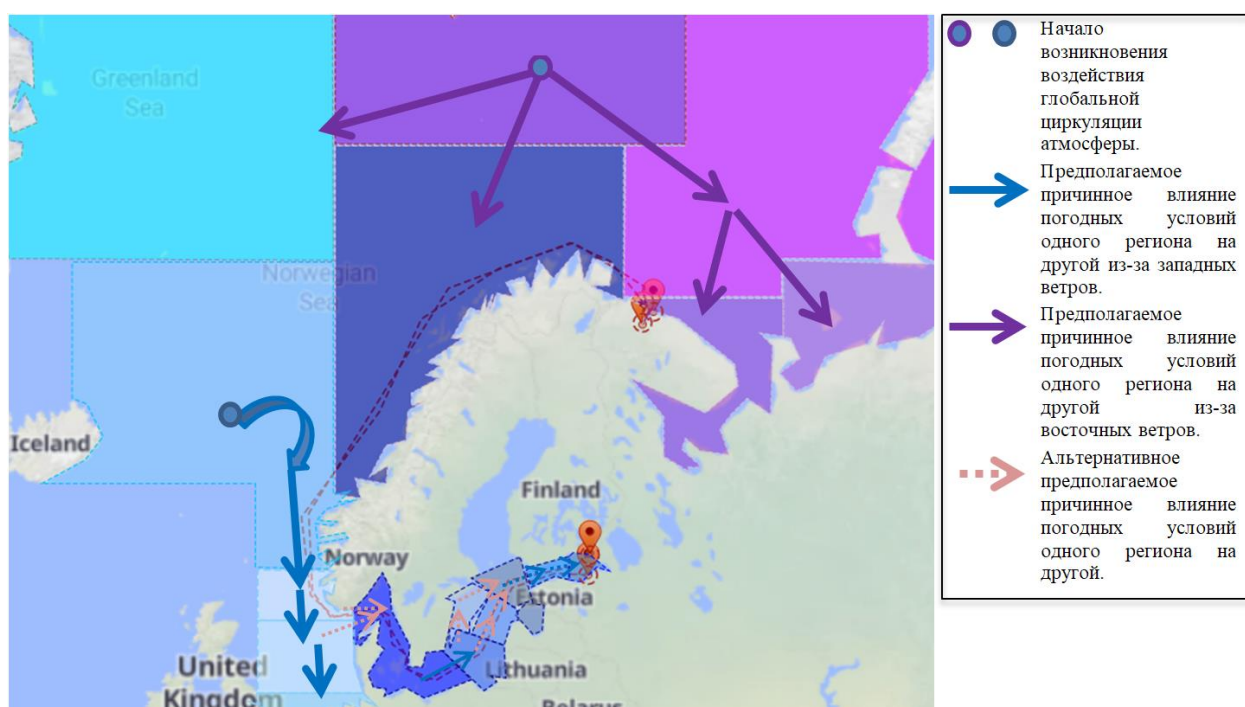


Рисунок 7 – Районирование морских участков и распределение гипотетических векторов перемещения воздушных масс

На рисунке продемонстрированы векторы гипотетического перемещения воздушных масс между соседними морскими участками на основе западных

ветров (голубой цвет векторов) и восточных ветров (сиреневые вектора). Наравне со всеми векторами, однозначно отражающими воздействие гидрометеорологических условий между соседними морскими участками, имеются вектора, отражающие воздействия, направления которых необходимо проверить с помощью специализированных статистических тестов (темно-оранжевый цвет векторов).

Гипотезы по распределению направления ветровых волн аналогичны гипотезам перемещения воздушных масс, т.к. эмпирически установлено, что направление ветровых волн не отличается от направления ветра более чем на 45 градусов [2], [3]. Однако данное утверждение может быть опровергнуто в ходе исследования временных рядов гидрометеорологических условий.

Моделирование ветро-волнового режима производится по статистическим данным исследовательской системы островов Тихого океана университета Гавайи за 2016-2020 гг. в виде временных рядов с шагом в 3 часа [54], [55] в среде RStudio для снижения вычислительной нагрузки на имитационную модель.

Постановка оптимизационной задачи

Требуется спроектировать такую транспортную систему снабжения СПГ г. Мурманска и Мурманской области с использованием морского транспорта, при которой достигался бы минимум суммы операционных и капитальных затрат. На основании основных положений экономики эксплуатации водного транспорта была составлена целевая функция (1):

$$z = \sum_{k=1}^{\tau} k \left(c_{\text{voyage}_k} \frac{\sum_{\tilde{v}=1}^{\varphi_k} T_{\text{voyage}_{k\tilde{v}}}}{24} + c_{\text{ballast}_k} \frac{\sum_{\tilde{v}=1}^{\varphi_k} T_{\text{ballast}_{k\tilde{v}}}}{24} + c_{\text{idle}_k} \frac{\sum_{\tilde{v}=1}^{\varphi_k} T_{\text{idle}_{k\tilde{v}}}}{24} \right) + \sum_{k=1}^{\tau} \text{Cost}_{\text{ves}_k} + \sum_{\tilde{s}=1}^{\tilde{\tau}} \text{Cost}_{\text{st}_{\tilde{s}}} \rightarrow \min_{\text{ves}, \text{rt}}, \quad (1)$$

где z – суммарные затраты на проект морской транспортной системы газоснабжения г. Мурманск, руб.; $rt \in R_t$ – выбранный маршрут поставок; $T_{\text{voyage}_{k\tilde{v}}}$ – продолжительность хода k -го газовоза в \tilde{v} -ом рейсе, зависящая от выбранного маршрута, т.е. $T_{\text{voyage}_{k\tilde{v}}} = T_{\text{voyage}_{k\tilde{v}}}(rt, \text{ves})$, час.; $T_{\text{ballast}_{k\tilde{v}}}$ –

продолжительность хода порожнем k -го газовоза в \tilde{v} -ом рейсе, зависящая от выбранного маршрута, т.е. $T_{ballast_{k\tilde{v}}} = T_{ballast_{k\tilde{v}}}(rt, ves)$, час.; $T_{idle_{k\tilde{v}}}$ – продолжительность простоя k -го газовоза в \tilde{v} -ом рейсе, час.; c_{voyage_k} – расходы по содержанию k -го газовоза в сутки хода с грузом, руб/сут.; $c_{ballast_k}$ – расходы по содержанию k -го газовоза в сутки хода порожнем, руб/сут.; c_{idle_k} – расходы по содержанию k -го газовоза в сутки стоянки, руб/сут.; $Cost_{ves_k}$ – строительная стоимость k -го судна типа ves , руб.; $Cost_{st_{\tilde{s}}}$ – строительная стоимость \tilde{s} -го хранилища газа типа st , зависящего от типа газовоза, т.е. $st = st(ves)$, руб.; τ – число требуемых для эксплуатации на рассматриваемой линии газовозов, зависящее от составляемого в модели расписания, т.е. $\tau = \tau(t_{bdep}, ves)$, ед.; $\tilde{\tau}$ – число требуемых для газоснабжения г.Мурманск ПлХГ, ед.

На основании требований к проекту транспортной системы газоснабжения была составлена система ограничений (формула 2), учитывающая требования по наличию неснижаемого (3%-ый запас СПГ и 3-х дневный запас по максимальному потреблению) уровня СПГ в хранилище, по сроку доставки без потери качества СПГ и ограничения хранилища по вместимости:

$$\begin{cases} LNG_{st_{\tilde{s}}} \geq 0.03 * Cap_{st_{\tilde{s}}} + Cons_{max_l} * 24 * 3 \\ t_{bdep} \leq t_{крит} \\ LNG_{st_{\tilde{s}}} \leq Cap_{st_{\tilde{s}}} \end{cases} \quad (2)$$

где $LNG_{st_{\tilde{s}}}$ – уровень СПГ в \tilde{s} –ом ПлХГ типа st в момент времени t , m^3 ; $Cap_{st_{\tilde{s}}}$ – вместимость \tilde{s} -го ПлХГ типа st , m^3 ; $Cons_{max_l}$ – максимальный суточный спрос на СПГ 1-го потребителя в г. Мурманск, $m^3/час$; t_{bdep} – продолжительность времени между отправлениями двух соседних по расписанию эксплуатации газовозов, зависящая, в том числе, от $LNG_{st_{\tilde{s}}}$ и от $Cap_{st_{\tilde{s}}}$, час.; $t_{крит}$ – критическая продолжительность времени между отправлениями двумя соседними в расписании эксплуатации газовозами, час.

Более подробно элементы целевой функции (1) и системы ограничений (2) описаны в п. 2.1.1 и п. 2.1.2. главы 2.

Обзор литературы

Точкой отсчета накопления и распространения опыта по внедрению имитационных моделей в широкие массы можно считать 1970-е гг., когда впервые были организованы первые курсы по имитационному моделированию [11]. На фоне исследования систем массового обслуживания, актуальными для построения имитационных моделей также являлись и логистические системы, в т.ч. с использованием морского транспорта.

Так, в 1974 г. издается книга Томаса Дж. Шрайбера, в которой рассматривается задача симуляции перевозки нефти и нефтепродуктов танкерами посредством GPSS/H [23]. Данная задача рассматривается в разрезе запланированных событий, в связи с которыми происходит смена состояний системы.

Далее, в 1976 г. в книге по имитационному моделированию, реализованному на языке SIMSCRIPT в качестве примера симуляции большого сложного дискретного процесса проиллюстрирована обработка судов в гавани [24]. Принцип построения имитационной модели также основан на списке запланированных событий (скриптах).

В книге Алана А. и Б. Притцкера 1995 г. изложено введение в имитационное моделирование и использование языка программирования SLAM II – первого языка программирования, позволяющего составить описание исследуемой системы в рамках процессов, событий и переменных [23]. В данной книге представлен комплексный способ построения имитационной модели с применением непрерывного и дискретного типов моделирования на примере транспортной модели по разгрузке нефти морским транспортом. Так, дискретными событиями являлись прибытия танкеров на разгрузку, закрытие и открытие дока по расписанию работы, а уровни нефти в хранилище задавались с помощью переменных непрерывного состояния, скорости изменения которых описывались с помощью дифференциальных уравнений.

В публикации Дж. Бенкса 1999 г. [15], изданной в рамках докладов Winter Simulation Conference, содержится анализ дискретно-событийного имитационного моделирования, по результатам которого были приведены ключевые понятия:

- 1) симуляция – имитация проведения реальных процессов или систем на протяжении заданного времени функционирования;
- 2) модель – репрезентация реальной системы;
- 3) событие – случай, меняющий состояние системы;
- 4) переменные состояния системы – коллекция всей информации, необходимой для определения того, что происходит с системой для достижения желаемого результата;
- 5) дискретно-событийная имитационная модель – модель, в которой переменные состояния системы меняются только в те дискретные моменты времени, в которых происходят события.

На протяжении 20 лет интерес к имитационному моделированию усиливался, по мере развития данной тенденции модернизировалось аппаратное обеспечение ЭВМ и разрабатывались более сложные структурно и эффективные (по отношению к затрачиваемым ресурсам и времени вычислений) программные среды для имитационного моделирования. Интерес к имитационному моделированию проявлялся как инициативно со стороны студентов и соискателей ученых степеней, так и со стороны правительств и коммерческих компаний. Не стало исключением и применение средств имитационного моделирования в логистических системах морского транспорта. Рассмотрим выборку отечественных трудов по тематике имитационного моделирования в сфере морского транспорта.

Отечественные исследования в области имитационного моделирования транспортных процессов на морском транспорте можно укрупненно разделить на две категории:

1) теоретические, результаты которых послужили базой для проведения дальнейших исследований;

2) прикладные, результатами которых являются имитационные транспортные модели в виде программных продуктов (комплексов), используемых транспортными компаниями и/или Правительством, либо положения нормативных документов, соблюдаемых в обязательном порядке субъектами транспортного процесса.

Теоретические исследования. Большинство выполненных исследований в области морского транспорта с применением средств имитационного моделирования выполнено в рамках технологического проектирования перегрузочных комплексов. Основными представителями авторства исследований являются преподаватели морских университетов (ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова), а также ПГУПС и ВШЭ. Частично применение средств имитационного моделирования в исследовании морских транспортных процессов рассмотрено сотрудниками Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко РАН.

В статье [33] предложен метод оценки ресурсов морского фронта, основанный на имитационном моделировании: с дискретным шагом времени в 1 час симулируется обслуживание причальным фронтом поступающих судов через случайный промежуток времени. Согласно авторам, полученные оценки показателей работы причального фронта свидетельствуют об адекватности модели, благодаря чему данный подход является перспективным направлением в технологии проектирования портов.

Статья [34] освещает некоторые вопросы, касающиеся разработки системы имитационного моделирования работы морского порта, включающей подходный канал и смежный транспорт. Данная работа имеет аналогичный относительно предыдущей статье подход к симуляции логистических процессов, однако направлена на конкретные условия контейнерного терминала в порту Тамань.

Один из способов учета влияния внешних условий на деятельность морских перегрузочных комплексов описывается в статье [36]. В работе авторами учитываются дноуглубительные работы на территории акватории морского порта. Статья содержит описание концептуальной модели, отражающей общий подход к решению задачи составления оптимального расписания дноуглубительных работ в подходном канале произвольного морского порта. При допущении, что во время проведения дноуглубительных работ движение судов по акватории порта останавливается, накладываются дополнительные ограничения на задачу минимизации потерь как судовладельцев, чьи суда задерживаются в акватории порта, так и капитана порта, в рамках интересов которого поддерживать гарантированные габариты судового хода на территории акватории морского порта.

Недостатки норм технологического проектирования перегрузочных комплексов по состоянию на 2017 г. освещены в статье [35]. Отмечается, что с целью повышения эффективности применения норм технологического проектирования требуется внедрение средств имитационного моделирования на уровне регламентаций. Стоит отметить, что нормы технологического проектирования морских портов уже от 2018 г. [1] содержат рекомендации по использованию средств имитационного моделирования для уточнения технических и эксплуатационных показателей функционирования причалов.

В отличие от ранее рассмотренных трудов, работа [37] ставит акцент на значимости моделирования самих грузопотоков, проходящих через перегрузочные терминалы, а не этих перегрузочных терминалов. Также, подчеркиваются структурное и функциональное различия между морскими и сухопутными перегрузочными комплексами, что в свою очередь вызывает необходимость в построении для их изучения различных моделей. Имитационное моделирование авторами предлагается реализовать с учетом различных вариантов грузопотоков с целью обеспечения статистической достоверности требуемого уровня.

В рамках имитационного моделирования отечественными исследователями были рассмотрены такие смежные с транспортной системой процессы, как управление запасами. Так, в работах [21] и [39] методами имитационного моделирования в среде AnyLogic был рассмотрен «эффект хлыста» относительно различных стратегий управления запасами. Благодаря методу имитационного моделирования и возможностям выбранной программной среды был проведен оптимизационный эксперимент по критерию минимума затрат по всем процедурам внутри произвольной цепочки поставок.

В обзорной работе [45] в рамках выявления точек развития транспортного комплекса Арктической зоны РФ рассмотрены отечественные исследования в области имитационного моделирования транспортных и смежных процессов. Сотрудниками ИПТ РАН отмечается, что именно благодаря применению методов имитационного моделирования возможно на качественно новом уровне оценить возможности развития транспортного комплекса в Арктической зоне РФ с учетом суровых природных условий региона.

Прикладные исследования. Авторы отечественных исследований в области имитационного моделирования транспортных процессов морского транспорта представлены сотрудниками научно-исследовательской организации ФГУП «КГНЦ», преподавателями морских ВУЗов (ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, ГУМРФ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, БГАРФ ФГБОУ ВПО «КГТУ»), государственными организациями (Комитет по туризму СПб, ФГУП «Росморпорт»), а также компании-разработчика программного обеспечения для имитационного моделирования Anylogic LLC.

Статья [29] содержит описание имитационной модели Новороссийского контейнерного терминала. Данная имитационная транспортная модель была разработана сотрудниками компании ООО «Экс Джей Текнолоджис» (в н.вр. – Anylogic LLC) для компании ООО «Морстройтехнология». Разработка данной модели выполнена в среде имитационного моделирования AnyLogic. Суть данной модели заключается в имитации работы контейнерного терминала

(включая варианты построения склада относительно типов перевозимых грузов, этажности складирования, структуры экспорта и импорта и др.), а также внутрипортового, магистрального и морского транспорта с целью получения результата выполнения сценария «What if». Выбор начальных условий в данной модели может задаваться как базами данных или таблицами значений формата MS Excel или Access, так и вручную на начальном экране работы модели. Авторы отмечают, что расчётные (аналитические) методы определения требуемого количества транспортных средств с учетом множества факторов (различные объемы судовых партий и интервалы между прибытиями судов, ограничение на высоту складирования контейнеров и др.) отсутствуют, в связи с чем для решения данной проблемы и прибегли к имитационному моделированию. В итоге, авторы (и разработчики модели) данной статьи утверждают, что по результатам работы данной модели возможно составить качественную проектную документацию и сделать ряд экспертных заключений по проекту.

В статье [40] приводится описание методики построения дискретно-событийной имитационной модели морского порта. Основное внимание в данной статье уделено принципу расчетов моментов времени, в которые происходят порождаемые транспортными потоками транспортно-технологические процессы. При этом, ключевым показателем, характеризующим взаимодействие транспортных потоков, является интервал времени (случайная величина) между прибытием транспорта, ввозящего груз, и прибытием транспорта, вывозящего тот же груз. Данный подход является логичным в связи с рассмотрением дискретно-событийного типа имитационного моделирования. Перемещение партий груза в рамках данной модели сопровождается объединением или разделением транспортных потоков в зависимости от вместимости транспортных средств. В завершение статьи автор приводит информацию об успешной апробации данной методики в

программе BaltInLog PortInvest, представляющей собой среду имитационного моделирования морских портов и терминалов.

В 2014 г. сотрудники ООО «Морстройтехнология» по заказу ФГУП «Росморпорт», в числе прочего, разработали имитационную модель работы морского фронта и контейнерного склада [56]. В данной модели были учтены и выполнены расчеты по дифференцированию по типам судов и контейнеров, сезонной неравномерности грузопотоков, среднему времени простоя контейнеров, производительности причальных перегружателей и допустимым судовым ожиданиям. В результате выполнения имитационного моделирования были определены направления, по которым перевозки по северному морскому пути имеют конкурентное преимущество. Также, определены риски и оптимальные характеристики контейнерной линии и необходимые условия реализации проекта.

Работа [38] посвящена имитационному моделированию процессов переработки каботажных судов (судов с прибрежными маршрутами хода). Одной из особенностей данной модели является представление времени полного цикла движения одного судна от одного терминала до другого и обратно в виде случайной величины, подчиненной гамма-распределению. Соответственно, моделирование движения транспортных средств в данной модели осуществлено с детализацией до конкретного судна, а не как единого транспортного потока. Генерация случайных величин в данной модели реализована в виде алгоритма И.Г. Аренса [14] с параметром $\lambda=1$. В результате серии генераций случайных величин, согласно методу Монте-Карло, были получены взвешенные несмещенные оценки времени хода полного цикла для некоторых судов из выборки между терминалами. 11 января 2016 г. данная имитационная модель процессов обработки каботажных судов (ИМПОКС) была зарегистрирована в качестве программы для ЭВМ.

Следующая работа [42] является описанием результатов, полученных на начальном этапе построения имитационной транспортной модели сотрудниками

ФГУП «КГНЦ» с 2012 года. Данная имитационная модель представляет собой логико-математическое описание морской транспортной системы, организованной на территории с тяжелыми ледовыми условиями (Северный ледовитый океан, Баренцево море), при визуальном сопровождении симуляции имитируемых объектов. Так, авторами данной работы обозначен ряд факторов, которые невозможно учесть при применении симплекс-метода и пр. методов математического программирования по решению оптимизационных задач в рамках морской транспортной системы:

- 1) условие регулярности графика поставок груза;
- 2) непредвиденные задержки судна и/или ледокола во время рейса;
- 3) непостоянный принцип взаимодействия ледоколов и грузовых судов во время ледокольной проводки;
- 4) обрастания корпуса судна и движителей, что повышает расходы топлива;
- 5) необходимость в увеличении/уменьшении скорости движения судов во время одного рейса и др.

С целью учета данных факторов специалисты ФГУП «КГНЦ» в 2012 году приступили к разработке имитационной модели морской транспортной системы по вывозу сжиженного природного газа (СПГ) с месторождения в районе Чешской губы по двум маршрутам. Разработка выполнялась в среде имитационного моделирования AnyLogic. Цель данной модели заключалась в минимизации удельных затрат на перевозку СПГ (руб./м³) с учетом строгих условий по соблюдению графика поставки, варьируя количеством необходимых судов по перевозке газа (судов-газовозов) и их вместимостью. В данной модели были задействованы следующие типы имитационного моделирования:

- 1) дискретно-событийный – описывает сценарий вывоза СПГ при условии строгого соблюдения графика поставок;

2) агентный – описывает поведенческую модель судна-газовоза, ледокола, логику управления транспортной системой и геоинформационную компьютерную среду существования объектов модели.

Построение сценария вывоза СПГ выполняется при условии единой вместимости всех задействованных в работу судов-газовозов. В связи с этим основой данного сценария является заранее рассчитанный график равноудаленных по времени поставок, основанный на соответствии каждой вместимости судна-газовоза определенному числу поставок, распределяемым по линиям в соответствии со спросом на них. Гибкость дискретно-событийной имитационной модели сценария поставок заключается в варьировании некоторой отсрочки перед поставкой первой партии СПГ с объекта. В связи с этим, оптимизация морской транспортной системы сводится к варьированию значения отсрочки для каждой линии, а также вместимостью судов-газовозов, задействованных на рассматриваемых линиях.

Также, в связи с тем, что график поставок СПГ характеризуется не конкретными датами, а диапазоном временных дат для начала каждой поставки (с «окном» в 6-8 часов), особенностью данной модели является построение графика поставок по принципу раннего старта (в терминах метода PERT [16]), т.к. в виду ледовых условий и возможных задержек судна в рейсе по прочим факторам, неизвестно, когда потребуется следующее судно для выхода в рейс.

Следующий этап построения имитационной транспортной модели можно охарактеризовать публикациями группы сотрудников ФГУП «КГНЦ» [46], [28], в которых они описали принцип построения программного комплекса имитационного моделирования транспортных процессов. За основу построения данного комплекса были приняты наработки за 2012-2014 гг., упомянутые в предыдущей работе. В связи с этим, в рамках программного комплекса, помимо всех факторов, рассмотренных в предыдущей работе, были интегрированы дополнительно инструменты, учитывающие:

1) с высокой детализацией геоинформационные факторы, влияющие на ходовые качества судов (по тихой воде, при ветре и волнении, самостоятельное движение во льдах или в караване за ледоколом, в смерзающемся ледовом канале) и меняющиеся во времени гидрометеорологические условия (скорость и направление ветра и волн, толщина и плотность льда, условия видимости и батиметрические условия);

2) экономические факторы, формирующие особую среду для имитируемых объектов в налоговой (портовые сборы и особенности экономического субъекта государства, на территории которого рассматривается реализация морской транспортно-технологической системы), инвестиционной (строительная стоимость судов), правовой (различные схемы владения флотом) и др. сферах.

Данный программный комплекс был применен в 2014-2016 гг. для решения целого ряда прикладных задач:

1) создание модели ледоколов в Азово-Черноморском и Каспийском бассейнах (по заказу Федерального агентства морского и речного транспорта России) с целью снижения капитальных и операционных затрат системы ледокольной проводки;

2) оценка характеристик транспортной системы по вывозу углеводородов из Карского моря в западном и восточном направлениях, включая круглогодичное движение по трассам Северного морского пути, а именно характеристики судов, отвечающих минимуму суммарных затрат на обеспечение логистической схемы перевозок [41];

3) разработка имитационной модели движения крупнотоннажных танкеров из Обской губы до порта Мурманск в условиях смерзающегося ледового канала в припае с целью определения организационного обеспечения судов ледокольной проводкой, а также технического обеспечения (число и даты прокладки ледовых каналов, вместимость берегового резервуарного парка

арктического терминала и др.) и условий возникновения риска переполнения хранилищ;

4) разработка имитационной модели эксплуатации атомного ледокола-лидера (по заказу Минпромторга России) с целью определения величин грузопотоков одним и двумя ледоколами-лидерами при одной загрузке ядерного топлива в ледовых условиях различной степени тяжести [44]. Особенностью выполнения данной задачи является применение алгоритма Дейкстры (Dijkstra) для поиска оптимального пути на ориентированном графе по критерию минимума суммы эксплуатационных затрат – суммы произведений фрахтовой ставки судна на продолжительность прохода каждого из ребер графа в случаях прохождения с привлечением ледокольной проводки и без нее. Для учета возможности привлечения ледокола был построен «двухслойный» граф в трехмерном пространстве, в котором переход от одного «слоя» к другому описывался соответствующими ребрами, цена которых представляла собой произведение условного времени ожидания ледокола на его фрахтовую ставку. Подробное описание применения данного алгоритма, а также сравнительный анализ полученных результатов от применения этого и других алгоритмов оптимизации судовой маршрутизации в ледовых условиях различной степени тяжести приведено в [27];

5) выполнение комплексного анализа логистической схемы работы челночных танкеров на МЛСП «Приразломная» (по заказу ООО «Газпром нефть шельф») по экономическим и эксплуатационным параметрам [43], [47];

6) разработка концепции транспортной системы для арктического плавучего завода СПГ (по заказу Минпромторга России), в рамках которой была построена модель грузоопераций в порту, учитывающая погодные условия на динамику наполнения хранилища, а также учтен аварийный фактор – вывод из строя одного судна-газовоза. Результаты данной работы являются основой для дальнейшего проектирования плавучего завода СПГ и обеспечивающих его работу транспортных систем.

Зарубежные научные исследования в сфере имитационного моделирования транспортных процессов на водном транспорте за последние 3 года, в основном, представлены публикациями в сборниках ежегодной конференции «Winter Simulation Conference». Однако основной акцент данных работ смещен в сторону исследований технологических процессов внутри портов и в рамках этого – в сторону взаимодействий автомобильного, железнодорожного и водного видов транспорта. В связи с этим практически не рассматривается имитация эксплуатации водного транспорта, благодаря которой возможно провести оптимизацию технической составляющей морской транспортной линии с учетом имеющихся экономических и организационных ограничений и гидрометеорологических условий.

Работа коллектива авторов [19] посвящена имитационному моделированию функционирования портового комплекса с целью определения его пропускной способности, которую авторы ограничивают минимальной пропускной способностью одного из инфраструктурных ресурсов: причалов, станционных (сортировочных) зон и ворот порта. В данной статье подробно рассматривается организация работы ворот порта как системы массового обслуживания одного из городов в Азии с несколькими полосами движения. Согласно предположениям авторов на основе данных выборки, поток грузового транспорта, поступающего в порт, представляет собой неординарный пуассоновский поток автомобилей различной грузоподъемности. Симуляция данного процесса проводилась на языке программирования Java. По результатам оптимизации по критерию минимума продолжительности работы полос ворот порта с ограничением среднего времени нахождения автомобильного транспорта в системе (не более 25 мин) была установлена оптимальная политика по управлению полосами движения ворот порта.

В статье [18] приводится описание методологии оценки производительности порта с использованием имитационной модели на основе (в сотрудничестве с администрацией порта) порта Альхесирас (Андалусия,

Испания) – одного из крупнейших портов мира по контейнерообороту, обороту генеральных и навалочных грузов, а также транзитному потоку. Данная методология основана на методах анализа временных рядов и методе Монте-Карло, и применена при разработке программного комплекса OptiPort. С их помощью проводится анализ показателей производительности порта в различных организационных условиях. Особенностью данной методологии является стохастическое моделирование технических и эксплуатационных характеристик транспортного потока, по которым, в действительности, возможно было составить выборку значений или получить информацию, как минимум, организационного характера (расписание судозаходов, потребность в буксировке и др.). Вместо использования эмпирических законов распределений по имеющейся выборке исследователи аппроксимируют их к непрерывным законам, а также выполняют их прогноз с помощью метода анализа временных рядов:

1) трафик прибытия судов в различных случаях (в зависимости от времени суток, типа причала и пр.) может подчиняться Пуассоновскому, гамма распределению или закону распределения Эрланга, а время прибытия между ними – экспоненциальному закону распределения;

2) продолжительность стоянки судов у причалов может подчиняться нормальному, логнормальному или гамма распределению;

3) технические характеристики судов (грузовместимость, осадка, объем партии грузов и др.) подчиняются закону распределения Бернулли;

Также, модуль стохастического моделирования представлен авторегрессионной моделью прогнозирования ряда климатических факторов (направление и скорость ветра, бега волн и течения), эмпирическими законами распределения плотности тумана и продолжительности всех климатических характеристик, а также генерацией случайных величин по закону распределения Бернулли для определения типа видимости (низкая, средняя, хорошая).

Моделирование операций в порту осуществлено инструментами дискретно-событийного имитационного моделирования с шагом времени в 1 секунду при имитации процессов на протяжении 1 года. В этом случае порт представляет собой систему массового обслуживания, каналами которого являются совокупность причалов и ресурсов по обслуживанию прибывших судов (буксиры, перегрузочные краны, лоцманские катера и др.).

Поддержка принятия управленческих решений руководства порта осуществлена с применением метода SMAA-2 – многокритериального метода анализа решений для задач с неполной информацией. Метод основан на стохастическом моделировании путем генерации случайных величин для значений критериев и весов по их соответствующим законам распределения. Подробно данный метод описан в [20].

Вся модульная структура программы OptiPort предстает следующим образом:

1) модуль определения сценария работы порта – порт отображается в виде совокупности инфраструктурных объектов (причалы, каналы, перегрузочное оборудование и др.), расположенной в геоинформационной среде (GIS). В этой же среде указываются логика симуляции климатических условий (ветро-волновой режим, облачность, уровень воды и др.), морского транспортного потока (направления движения, скорости, состав флота и др.), сервисы порта (производственные районы, сезонная доступность производственных ресурсов, режим работы персонала и пр.) и критерии принятия управленческих решений (приоритетность в обслуживании определенных типов судов, организационные/технические мероприятия в зависимости от климатических и иных условий и др.);

2) модуль симуляции транспортно-технологических процессов – реализован в виде дискретно-событийной имитационной модели, которая в качестве исходной информации использует всю информацию об имеющихся объектах моделирования (судах, климатических условиях, политики управления

портом и пр.) и агрегирует полученную в результате моделирования работы порта информацию для ее дальнейшей обработки (расчет индикаторов производительности, определение статистических показателей, закона распределения и др.);

3) модуль результатов (оценки производительности порта) – содержит детальную информацию о показателях работы порта как системы массового обслуживания: средний коэффициент занятости порта, распределение времени обработки судов, интенсивность загрузки производственных ресурсов, среднее время ожидания в очереди (судна на рейде или у причала без оказания необходимых услуг) и др.;

4) оптимизационный модуль – на основе множества прогонов выбранного сценария работы порта реализует метод SMAA-2 в сравнительном анализе с другими возможными сценариями работы порта, предоставляя пользователю возможность выбора подходящего сценария в зависимости от критерия оптимизации. Также данный модуль при отсутствии указанного единого критерия оптимизации ранжирует реализованные сценарии работы порта, составляя (эмпирическое) вероятностное распределение того, насколько каждый сценарий выполним в действительности.

Таким образом, согласно данной методологии, программа OptiPort позволяет пользователю провести многофакторный анализ деятельности порта на основе детализированного имитационного моделирования морских транспортно-технологических процессов. Front-end (модуль определения сценария) данной модели разработан с использованием HTML5, CSS3 и Javascript, часть Back-end`а (модуль симуляции) – на языке программирования Java, остальные модули разработаны на языке программирования C++. По результатам моделирования работы порта Альхесирас в 2017-2018 гг. установлено, что относительное отклонение между реальными и смоделированными показателями производительности работы порта, в среднем, составило 1,43%. Также, визуально продемонстрировано незначительное

отклонение смоделированных показателей занятости причалов от реальных, что дополнительно свидетельствует об адекватности и точности построенной модели.

Отдельного внимания заслуживает статья [25], в которой приведено описание имитационной модели портового комплекса с включением инструмента управления запасами химического завода в порту Роттердам. Модель построена в среде имитационного моделирования Enterprise Dynamics (INCONTROL Simulation Software B.V.) и использует только дискретно-событийный вид имитационного моделирования. В данной модели имеются следующие отличительные черты:

1) вся схема транспортно-технологических процессов описывается в рамках транспортного потока прибывающих в порт судов, уровня причалов с расположенными на нем 4 точками швартовки для позиционирования судов различных габаритов, отнесенного для ожидания судов рейда, 4 танков для хранения химических веществ и химического завода;

2) производится сравнение трех вариантов потока прибывающих судов (требований): прибытие через равные промежутки времени (регулярный), прибытие в определенные моменты времени для поддержания заданного уровня химических веществ в танках и Пуассоновский транспортный поток (ординарный, стационарный и с отсутствием последствий);

3) характеристики прибывающих судов определяются генерацией случайных величин по закону, определенному из соответствующей выборки;

4) симуляция фактических дат прибытия в рамках рассмотрения регулярного потока осуществлена путем генерации отклонений (задержек или опережений графика прибытий) по эмпирическому распределению, построенному привлеченными в работу экспертами.

Стоит отметить, что данная модель также обладает и рядом недостатков:

1) упрощена логика моделирования перекачки химических веществ с судна в танк и с танка до завода (например, не учитывается ограничение на запрет одновременно погрузки в танк и выгрузки из танка);

2) допускается дефицит химических веществ в танках, что на практике для организации стабильной работы химического завода не представляется возможным.

Однако, по утверждению авторов, данные недостатки не влияют на результаты сравнительного анализа различных представлений транспортных потоков поступающих судов.

Результатами проведения имитационного моделирования являются характеристики транспортных потоков по различным вариантам. Было установлено, что прибытие судов в определенные моменты времени для поддержания заданного уровня химических веществ в танках определяет лучшие показатели работы порта как системы массового обслуживания: при такой организации работы флота достигаются наименьшая длина очереди и наименьшее среднее время ожидания судов на рейде для судов как с низким, так и высоким уровнями приоритета обслуживания.

Транспортные затраты составляют значительную долю в стоимости товаров и услуг, что побуждает мировое научное сообщество изыскивать способы их сокращения. Рост интереса и интенсификация внедрения имитационного моделирования в логистические процессы на водном транспорте подтверждает тот факт, что морские транспортно-технологические процессы достаточно сложны для получения адекватной оценки их эффективности аналитическими расчетами.

Однако основной акцент при моделировании в большинстве исследований смещен в сторону проектирования перегрузочных комплексов. Данный подход не учитывает множество нюансов при эксплуатации морского транспорта, включающих также стохастические факторы (гидрометеорологические и климатические условия, степень загрузки порта в зависимости от транспортного

потока и др.). Также, возможности аналитических методов моделирования весьма ограничены при расчете некоторых эксплуатационных показателей работы флота: например, достаточно высокой трудоемкостью обладают аналитические методы расчета потребности во флоте при условиях строгого соблюдения расписания или условиях неснижаемого запаса груза на складе [53]. В случае изменения типового состава флота или уровня неснижаемого запаса на складе аналитическая модель подлежит полной переработке.

Глава 1. Построение моделей временных рядов ветро- волнового режима

1.1. Моделирование одномерных временных рядов атмосферного давления

Рассмотрим временной ряд атмосферного давления в регионе, который принят за начало воздействия глобальной циркуляции атмосферы на гидрометеорологические условия других морских участков. Данный временной ряд будет исследован в качестве «самостоятельного» временного ряда, значения которого будут экстраполироваться с помощью модели SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)[L], где p – порядок лага авторегрессии, P – порядок сезонного лага авторегрессии, q – порядок лага скользящей средней, Q – порядок лага сезонной скользящей средней, d – порядок взятия разности, D – порядок взятия сезонной разности, L – длина сезонного цикла.

В настоящем исследовании будет использоваться модель SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)[L], поскольку она способна учитывать сезонную компоненту исследуемого объекта, а также ее применение показало свою эффективность в работе [18].

Напомним, что уравнение авторегрессионной проинтегрированной модели скользящего среднего с учетом сезонных колебаний имеет вид (формула 3) [7]:

$$\Phi_p(B^S)(1 - B^S)^D \varphi_p(B)(1 - B)^d y_t = \theta_Q(B^S)\theta_q(B)\varepsilon_t + c \quad (3)$$

где $\Phi_p(B^S)$ – оператор сезонных лагов, $(1 - B^S)^D$ – оператор интегрирования преобразованного временного ряда с учетом сезонных лагов, $\varphi_p(B)$ – лаговый оператор авторегрессии, $(1 - B)^d$ – оператор интегрирования исходного временного ряда, $\theta_Q(B^S)$ – оператор скользящей средней с учетом сезонных лагов, $\theta_q(B)$ – оператор скользящей средней, ε_t – значение белого шума в момент времени t , c – оценка некоторой константы.

Также в настоящем исследовании будут рассмотрены модели ADL(p,q) относительно временных рядов атмосферного давления тех морских участков,

которые расположены вдали от непосредственного воздействия глобальной циркуляции атмосферы. Данная модель была выбрана, поскольку она позволяет учитывать влияние других временных рядов на формирование исследуемого [31].

Стоит отметить, что при проведении статистических тестов в данной главе используется уровень значимости 0,05 [8].

Поэтапное проведение моделирования атмосферного давления на территории рассматриваемых морских участков выглядит следующим образом:

- 1) Определение морских участков, по территории которых проходит непосредственное воздействие глобальной циркуляции атмосферы (рисунок 5). Такими регионами (в дальнейшем, ключевыми) были выбраны первый регион Норвежского моря (перемещение западных ветров со стороны экватора) и четвертый регион Баренцева моря (перемещение восточных ветров в Северном полушарии). Для каждого из морских участков определяется центр участка;

- 2) Загрузка из открытого источника [54] временных рядов атмосферного давления размерностью 11 680 значений, соответствующих координате центра каждого морского участка. Проверка рядов на стационарность (тесты KPSS, ADF, тесты на сезонность Welch, Kolmogorov-Smirnov и др.) и приведение их к стационарному виду, фиксация параметров d и D ;

- 3) Выбор оптимальной модели SARIMA для временных рядов из ключевых регионов с точки зрения минимума информационного критерия AIC. Верификация модели путем проверки остатков модели на стационарность (тесты KPSS, ADF, тесты на сезонность Welch, Kolmogorov-Smirnov и др.) Результатами выбора оптимальных моделей являются модель SARIMA(4,1,4)(1,1,2)[8] для временного ряда значений атмосферного давления в первом регионе Норвежского моря и SARIMA(4,1,4)(0,1,1)[12] для временного ряда значений атмосферного давления в четвертом регионе Баренцева моря;

- 4) Построение схемы распределения воздействий глобальной циркуляции атмосферы на значение атмосферного давления на территории рассматриваемых морских участков (рисунок 8, 9):

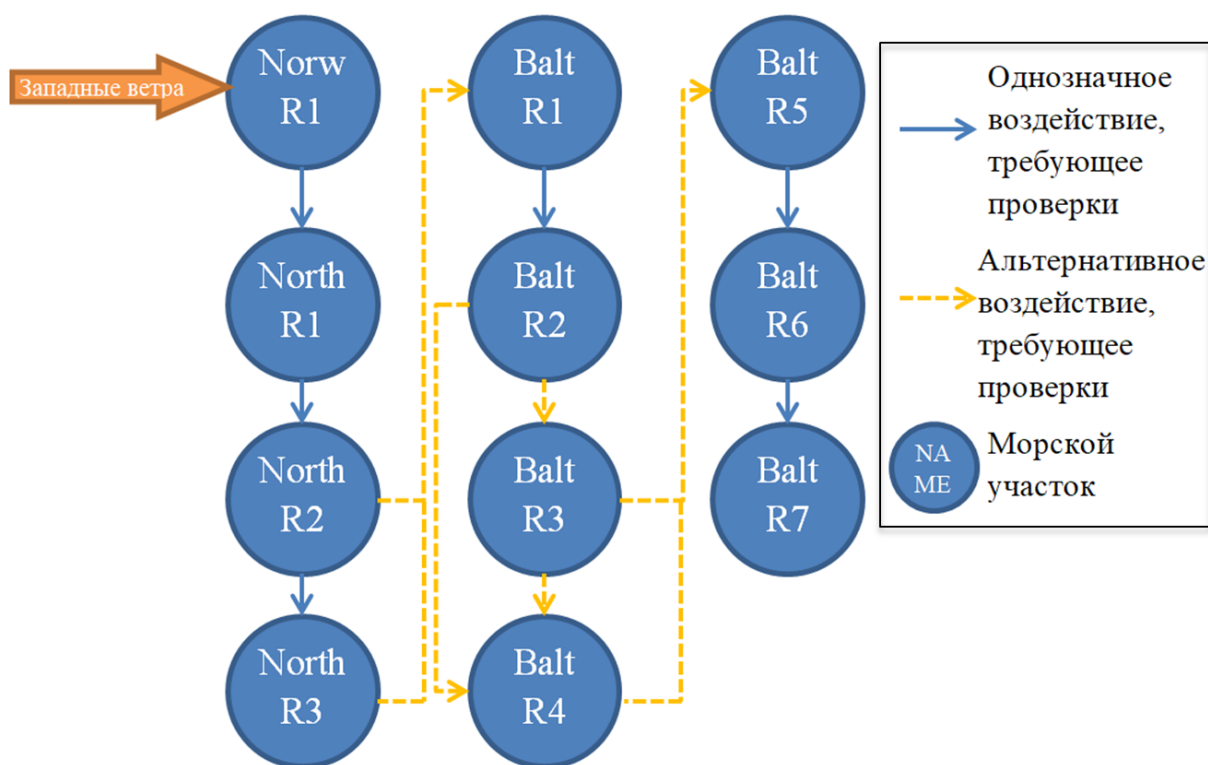


Рисунок 8 - Схемы распределения воздействий глобальной циркуляции атмосферы на значение атмосферного давления на территории морских участков, находящихся под воздействием западных ветров

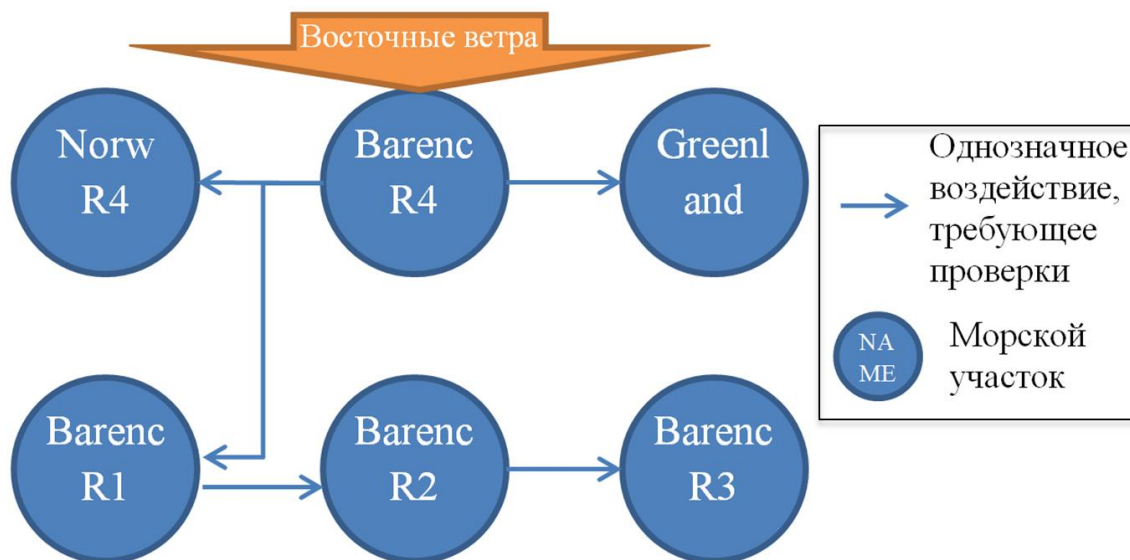


Рисунок 9 – Схема распределения воздействий глобальной циркуляции атмосферы на значение атмосферного давления на рассматриваемых морских участках, находящихся под воздействием восточных ветров

5) Создается множество стационарных временных рядов, состоящее из временного ряда, соответствующего j -му узлу с входящими неоднозначными воздействиями, и его соседей, имеющих выходящие неоднозначные

воздействия. Для каждого временного ряда из созданного множества проводится тест на причинность по Грейнджеру, по результатам которого подтверждаются или опровергаются неоднозначные воздействия западных ветров на погодные условия на территории морского участка, соответствующего j -му узлу;

б) Замена неоднозначных воздействий однозначными, построение новой схемы (рисунок 10);

7) Для каждого стационарного временного ряда не из ключевого участка, соответствующего i -му узлу схемы (рисунок 10) строим модель авторегрессии с распределенными лагами ADL(p, q) (формула 4), где p – порядок авторегрессии временного ряда, соответствующего i -ому узлу схемы, q – порядок авторегрессии временного ряда, соответствующего $i-1$ -му узлу схемы. Построение модели ADL(p, q) осуществляется по циклу с выбором наилучшей модели с точки зрения минимума значения информационного критерия AIC. Процедура аналогична для схемы на рисунке 9;

$$y_t = \sum_{i=1}^p a_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^q b_j x_{t-j} + \varepsilon_t, \quad (4)$$

где y_t – значение временного ряда в момент времени t , y_{t-i} – прошлое значение временного ряда на $t-i$ лаге, x_{t-j} – значение временного ряда-предиктора на $t-j$ -ом лаге, a_i – коэффициент при значении зависимого временного ряда, b_j – коэффициент при значении независимого временного ряда, ε_t – значение белого шума в момент времени t .

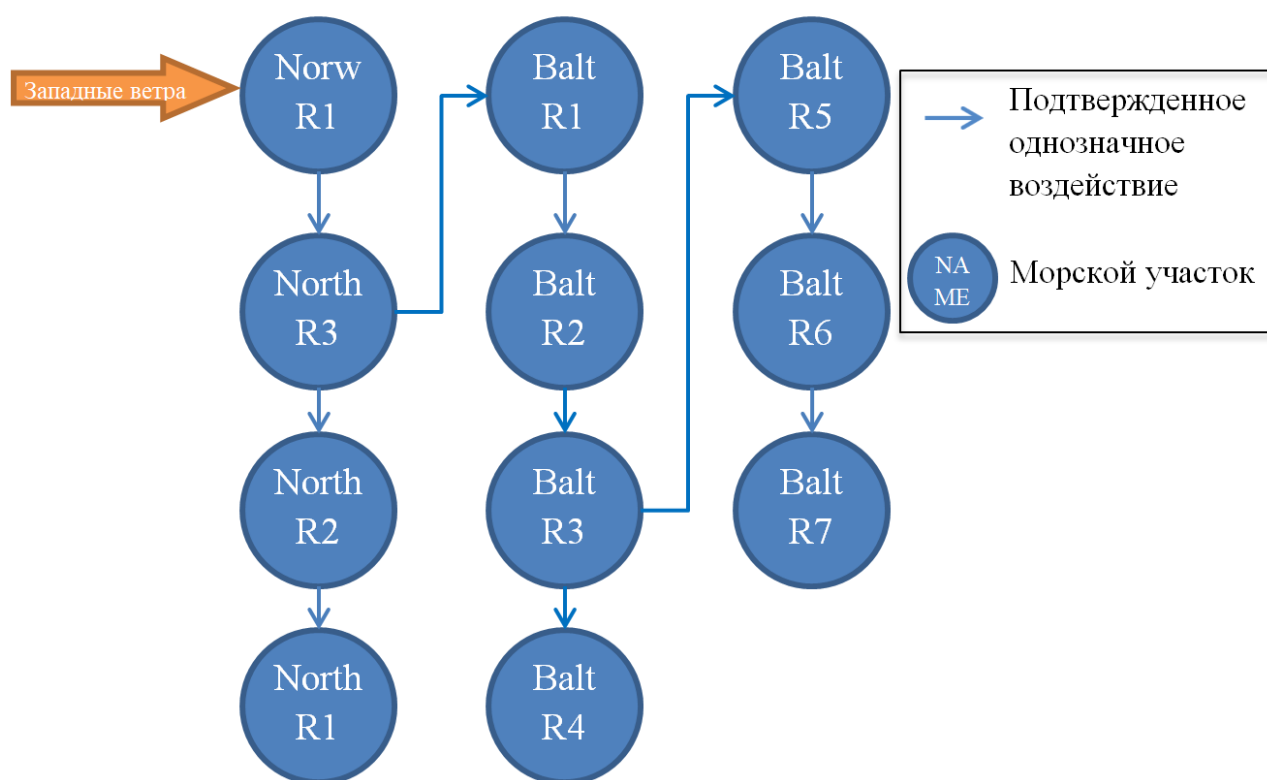


Рисунок 10 – Схема распределения проявления западных ветров согласно атмосферному давлению на морских участках после проведения теста на причинность по Грейнджеру

8) Верификация построенных моделей путем проверки остатков модели на стационарность (тесты KPSS, ADF, тесты на сезонность Welch, Kolmogorov-Smirnov и др.).

Построенными моделями одномерных временных рядов значений атмосферного давления в не ключевых морских участках являются:

- 1) участки 1-6 Балтийского моря – ADL(4,8);
- 2) участок 7 Балтийского моря – ADL(3,8);
- 3) участки Северного моря – ADL(4,8);
- 4) участок 2 Норвежского моря – ADL(4,8);
- 5) участки 1,2 Баренцева моря – ADL(4,8).

Все этапы моделирования атмосферного давления реализованы в среде RStudio.

1.2. Моделирование многомерных временных рядов гидрометеорологических условий

1.2.1. Моделирование векторной скорости ветра

Временные ряды векторной скорости ветра – многомерные временные ряды, значение которых в t -ый момент времени представляет собой вектор из 2 компонент: проекции скорости ветра на широтную и долготную координатные оси. Таким образом, при рассмотрении значений векторной скорости ветра по каждому региону с 2016 по 2020 гг. с шагом в 3 часа был составлен многомерный временной ряд размером 11689×2 [54].

Проверка на стационарность многомерных временных рядов осуществляется в следующем порядке:

1) проверка на стационарность каждого одномерного временного ряда, входящего в состав многомерного, приведение к стационарному виду всего многомерного временного ряда в случае, если хотя бы один одномерный временной ряд не стационарен. Взятие первой разности в большинстве случаев решает проблему нестационарности;

2) проверка при заданном уровне значимости многомерного временного ряда на коинтеграцию, т.е. проверка на существование хотя бы одной линейной комбинации одномерных временных рядов, которая являлась бы стационарным временным рядом. Данная проверка сводится к проведению статистических тестов на проверку ранга матрицы $|I-A|$, где I – единичная матрица размерности $k \times k$, A – матрица коэффициентов построенной модели VAR(1) для одномерных временных рядов, составляющих многомерный временной ряд. Если ранг матрицы полный, то одномерные временные ряды коинтегрированы. Взятие первой разности многомерного временного ряда в большинстве случаев решает проблему нестационарности.

После проведения проверок на стационарность и коинтеграцию многомерных временных рядов необходимо построение таких моделей временных рядов, как: векторная авторегрессионная модель (VAR), векторная авторегрессионная модель с экзогенным предиктором (VARX), векторная

модель скользящей средней (VMA) или векторная авторегрессионная модель скользящей средней (VARMA) (в т.ч. с добавлением сезонности) [13]. Данные модели были выбраны для анализа многомерных временных рядов, поскольку наилучшим образом отражают исследуемые авторегрессионные зависимости [6], [13], [17].

Структура векторных моделей схожа со структурой моделей одномерных временных рядов. Для примера продемонстрируем модель VAR(p) (формула 5):

$$\begin{pmatrix} y_{t1} \\ \vdots \\ y_{tk} \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^p \begin{pmatrix} A_{11} & \dots & A_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{k1} & \dots & A_{kk} \end{pmatrix}_i \begin{pmatrix} y_{t-i,1} \\ \vdots \\ y_{t-i,k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_{t1} \\ \vdots \\ \varepsilon_{tk} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где $\begin{pmatrix} y_{t1} \\ \vdots \\ y_{tk} \end{pmatrix}$ – значение многомерного временного ряда размерности k в t-ый момент времени, $\begin{pmatrix} A_{11} & \dots & A_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{k1} & \dots & A_{kk} \end{pmatrix}$ – матрица коэффициентов размерности kxk модели VAR(p), $\begin{pmatrix} \varepsilon_{t1} \\ \vdots \\ \varepsilon_{tk} \end{pmatrix}$ – многомерный белый шум размерности k в t-ый момент времени.

Для моделирования значений векторной скорости ветра в ключевых регионах строятся модели VARMA(p,q) (или SVARMA(p,q)(P,Q)[L] в случае наличия сезонной компоненты), выбирается наилучшая модель по критерию минимума AIC или BIC, верифицируется модель путем проверки остатков на стационарность (проверки по столбцам, проверки всего многомерного временного ряда с использованием статистики Льюинга-Бокса [6]).

Для моделирования значений векторной скорости ветра в регионах, смежных с ключевыми, строятся модели VARX(p,m) (по аналогии с построением моделей ADL(p,q) в п. 1.1), где p – порядок авторегрессии признака, m – порядок авторегрессии внешнего предиктора. В данном случае построение моделей временных рядов векторной скорости ветров, связанных с западными ветрами, осуществляется согласно схеме, представленной на рисунке 11. Построение моделей векторной скорости ветров, связанных с

восточными ветрами, происходит согласно рисунку 9, т.к. все причинные воздействия подтверждены тестом Грейнджера.

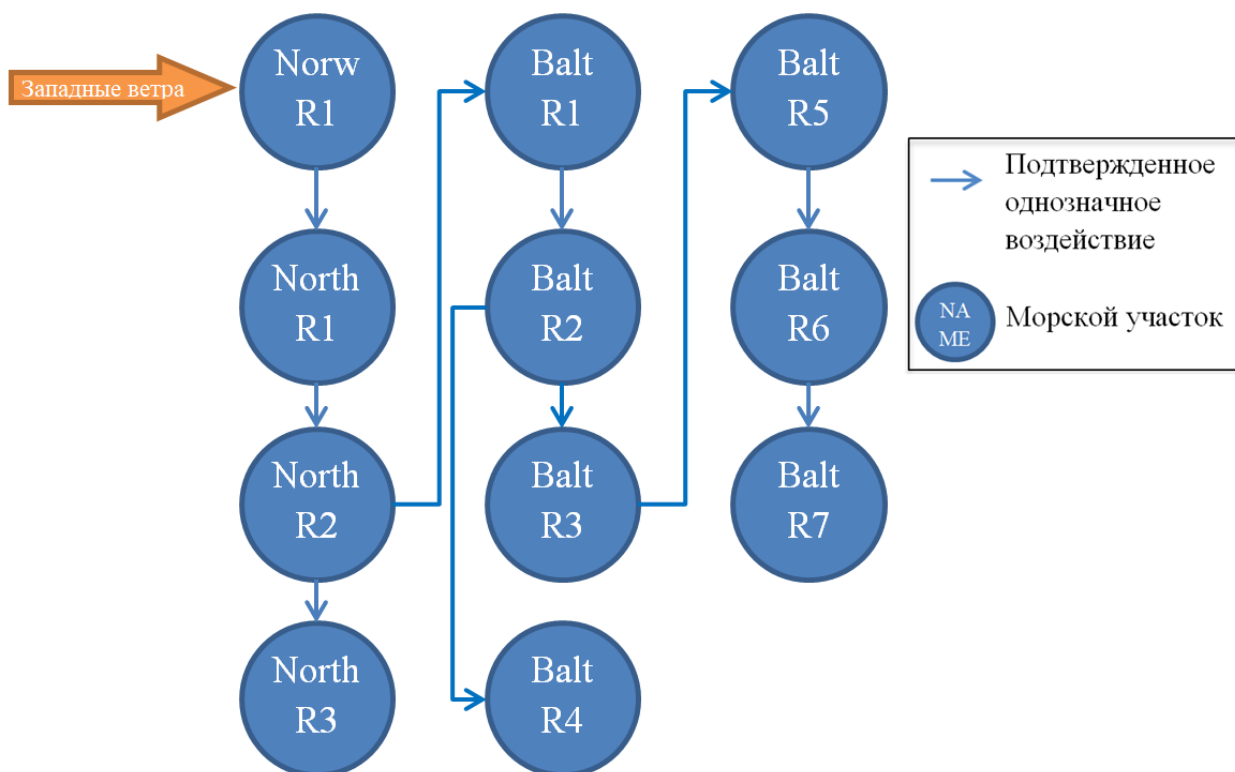


Рисунок 11 – Схема распределения воздействий западных ветров на ветровой режим на рассматриваемых морских участках после проведения теста на причинность по Грейнджеру

Результатами моделирования многомерных временных рядов векторных скоростей ветра являются следующие модели:

- 1) участки 1,2 Балтийского моря – VARX(3,5);
- 2) участок 3 Балтийского моря – VARX(2,3);
- 3) участок 4 Балтийского моря – VARX(3,4);
- 4) участок 5 Балтийского моря – VARX(4,3);
- 5) участки 6,7 Балтийского моря – VARX(4,6);
- 6) участок 1 Северного моря – VARX(6,4);
- 7) участок 2 Северного моря – VARX(3,6);
- 8) участок 3 Северного моря – VARX(2,7);
- 9) участок 1 (ключевой) Норвежского моря – VARMA(2,6);
- 10) участок 2 Норвежского моря – VARX(4,5);
- 11) участок 1 Баренцева моря – VARX(4,7);

12) участок 2 Баренцева моря – VARX(4,6);

13) участок 4 (ключевой) Баренцева моря – VARMA(4,3).

1.2.2. Моделирование параметров ветровых волн

Исследовательский интерес представляют следующие параметры ветровых волн: направление бега и высота волн. Рассмотрим данные о ветровых волнах, полученные из [55], т.е. информацию про направление бега ветровых волн.

Направление бега ветровых волн описывается угловой координатой, для которой характерна периодичность значений (например, угол в 0 градусов и 360 градусов описывают одно и то же направление бега). Поскольку периодичность значений нарушает условие стационарности (инвариантность параметров распределения относительно времени [31]), необходимо преобразовать имеющуюся информацию в проекции скоростей волн на широтно-долготную сетку. Так, порядок проведения анализа временных рядов параметров ветровых волн будет совпадать с порядком проведения анализа временных рядов проекций векторной скорости ветра. Перейдем к следующему алгоритму преобразования исходных данных и их дальнейшего анализа:

1) Рассчитывается абсолютная скорость ветра (W) для регионов, по которым имеется информация о динамике ветровых волн (в нашем случае, для открытых участков морей);

2) Рассчитывается коэффициент крутизны волны (ε , формула 6), длина разгона волны (D , формула 7) и длина волны (L , формула 8) [источник]:

$$\varepsilon = \frac{1}{0.9\sqrt{100+W^2}} \quad (6)$$

$$D = 30W^2\varepsilon \quad (7)$$

$$L = 0.073 * W * \sqrt{\frac{D}{\varepsilon}} \quad (8)$$

3) Рассчитывается скорость волны (v) (формула 9):

$$v = 1.25\sqrt{L} \quad (9)$$

4) Абсолютная скорость волн на основании известных направлений бега волн преобразовывается в проекции скоростей ветра на широтно-долготную

сетку, используя полярную замену. Стоит отметить, что преобразование абсолютной скорости и направления бега волн происходит с учетом того, что полученные направления бега волн измеряются в румбовых углах [50], в связи с чем в уравнении проекций синус и косинус меняются местами и исчезают знаки минуса (формула 10):

$$v_x = v \cdot \sin\left(\frac{\varphi\pi}{180}\right), v_y = v \cdot \cos\left(\frac{\varphi\pi}{180}\right), \quad (10)$$

где v_x – проекция скорости ветра на широтную сетку, v_y – проекция скорости ветра на долготную сетку, φ – направление бега волн (румб. град).

5) На основе полученных проекций скорости происходит моделирование динамики ветровых волн аналогично алгоритму моделирования векторной скорости ветра (см. п.1.2.1.).

Расчет высоты волн для участков открытого моря будет производиться согласно алгоритму моделирования многомерных временных рядов, где в качестве второго измерения выступает период волны, поскольку между данными параметрами (помимо связи в физическом смысле) выявлена сильная причинная связь по Грейнджеру в обе стороны.

Стоит отметить, что в ходе исследования было выявлено отсутствие причинного влияния по Грейнджеру динамики (изменения высоты, периодов и векторной скорости ветра) волнового режима в соседних регионах друг на друга. Однако было установлено причинное влияние векторной скорости ветра на многомерный временной ряд высоты и периода ветровых волн внутри одного морского участка, что подтверждается физическим смыслом происхождения ветро-волнового режима. В связи с этим модели VARX(p,m) для проекций скорости бега ветровых волн, а также высоты и периода ветровых волн будут построены на основе выявленного причинного влияния динамики ветрового режима в рассматриваемом регионе.

Схема причинных связей между параметрами ветро-волнового режима регионов представлена на рисунках 12 и 13.

Для закрытых участков моря высота волны будет определяться согласно формуле 11 [10]:

$$h = 0.073 * W * \sqrt{D\varepsilon} \quad (11)$$

Векторные скорости ветровых волн для закрытых участков моря будут рассчитаны на основе модели многомерной линейной регрессии, построенной для открытого морского участка №2 Северного моря, на основании следующих умозаключений. В п. 1.2.1. выявлено причинное влияние векторной скорости ветра на участке 2 Северного моря на векторную скорость ветра на участке 1 Балтийского моря. В связи с тем, что экспертным путем установлена зависимость динамики ветровых волн от ветрового режима региона [2], [3], предиктором волнового режима на участке 2 Северного моря выступает векторная скорость ветра на том же участке. Для данного участка построена модель многомерной линейной регрессии зависимости векторной скорости волн от векторной скорости ветра. Эта модель в дальнейшем используется для расчета векторной скорости волн на остальных участках Балтийского моря, предиктором в которой является векторная скорость ветра отдельно по каждому участку моря.

Все операции по выполнению данной части исследования выполняются в среде RStudio.

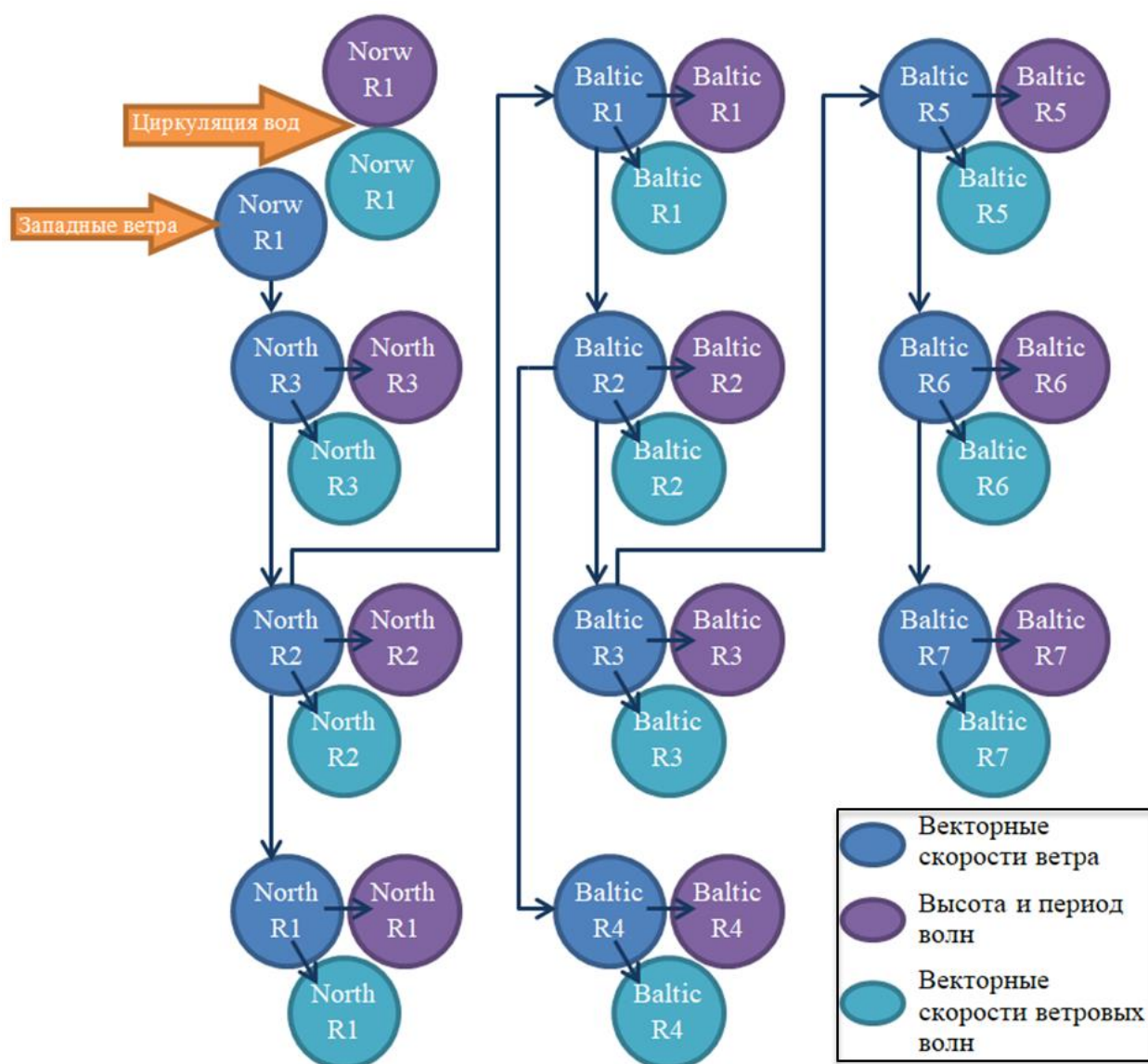


Рисунок 12 – Схема распределения воздействий западных ветров на ветро-волновой режим рассматриваемых участков

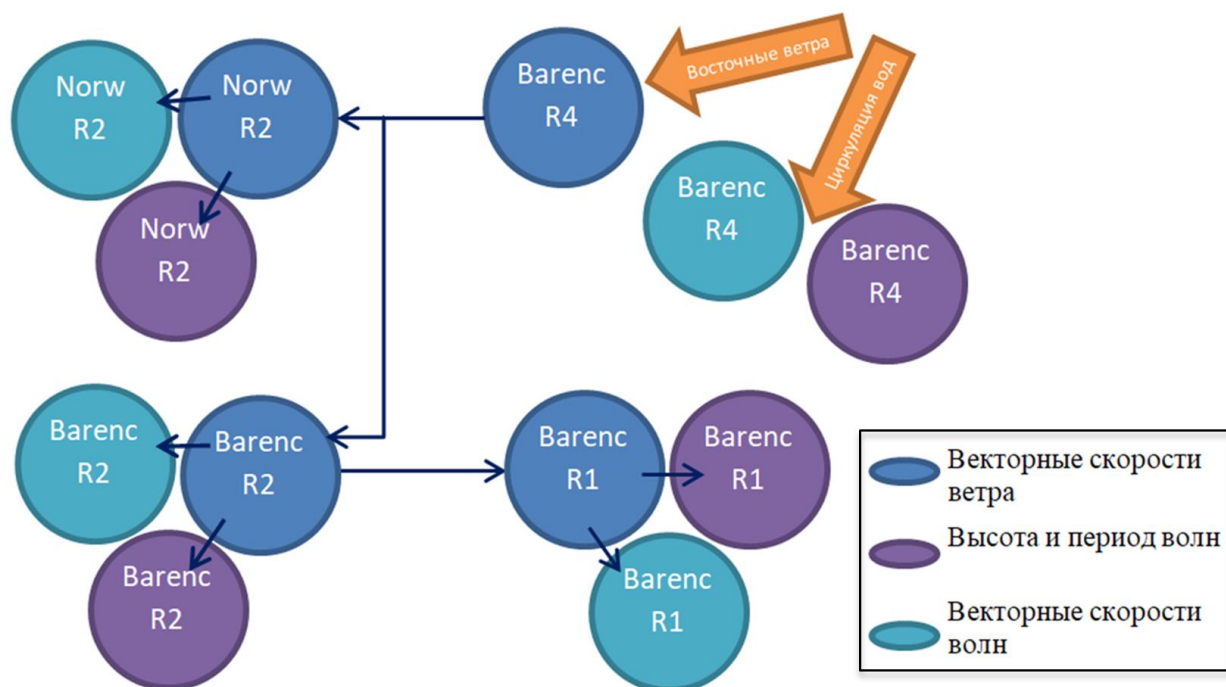


Рисунок 13 - Схема распределения воздействий восточных ветров на ветро-волновой режим рассматриваемых участков

Таким образом, поэтапное проведение исследования многомерных временных рядов гидрометеорологических характеристик в рассматриваемых регионах осуществляется в следующем порядке:

- 1) Проверка всех временных рядов на стационарность (коинтеграцию) и приведение к стационарному виду в случае необходимости;
- 2) Построение для многомерных временных рядов в ключевых регионах моделей VARMA(p,q) (или SVARMA(p,q)(P,Q)[L] в случае наличия сезонной компоненты), выбор наилучшей модели по критерию минимума AIC или BIC, верификация модели путем проверки остатков модели на стационарность (повекторные проверки, проверки всего многомерного временного ряда с использованием статистики Льюинга-Бокса [6]);
- 3) Построение схемы гипотетического распределения воздействия движения воздушных масс на погодные условия в соседних регионах, проверка гипотез данного распределения проведением теста на причинность по Грейнджеру для одномерных и многомерных временных рядов (аналогично работам с атмосферным давлением), построение новой схемы распределения подтвержденных воздействий;

4) Для временных рядов ветро-волнового режима в не ключевых регионах открытых морских участков в соответствии с распределением воздействий, определенным в п.3, проводится построение моделей $VARX(p,m)$, где p – порядок лага авторегрессии, m – порядок лага экзогенного предиктора;

5) Гидрометеорологические условия закрытых морских участков определяются по построенным моделям $VARX(p,m)$ векторной скорости ветра, эмпирической формуле 11 и модели многомерной линейной регрессии.

Результатами моделирования многомерных рядов высоты и периода ветровых волн являются следующие модели:

- 1) участок 1 Северного моря – $VARX(4,5)$;
- 2) участки 2, 3 Северного моря – $VARX(4,1)$;
- 3) участок 1 (ключевой) Норвежского моря – $VARMA(2,2)$;
- 4) участок 2 Норвежского моря – $VARX(4,5)$;
- 6) участок 1 Баренцева моря – $VARX(4,7)$;
- 7) участок 2 Баренцева моря – $VARX(4,1)$;
- 8) участок 4 (ключевой) Баренцева моря – $VARMA(5,1)$.

Результатами моделирования многомерных временных рядов векторной скорости ветровых волн являются следующие модели:

- 1) участки 1,3 Северного моря – $VARX(4,6)$;
- 2) участок 2 Северного моря – $VARX(4,5)$;
- 3) участок 1 (ключевой) Норвежского моря) – $VARMA(1,3)$;
- 4) участок 2 Норвежского моря – $VARX(5,5)$;
- 5) участок 1 Баренцева моря – $VARX(4,7)$;
- 6) участок 2 Баренцева моря – $VARX(6,7)$;
- 7) участок 4 (ключевой) Баренцева моря – $VARMA(1,3)$.

Результаты прогноза параметров ветро-волновых режимов рассматриваемых морских участков на 1 год с шагом в 3 часа выгружаются в виде таблицы в файл формата *.xlsx для внедрения его в программную среду разработки имитационной модели.

Глава 2. Построение имитационной модели транспортной системы газоснабжения г. Мурманск

2.1. Инициализация массива исходных данных и функционала

2.1.1. Множества (массивы) исходных данных и временных переменных

- 1) t – переменная модельного времени, ч, $t \neq \text{const}$, $t \in R$;
- 2) $t_{\text{крит}}$ – критическое время между соседними рейсами газовозов, $30,5 \cdot 24 = 732$ ч.;
- 3) $\text{Mon} = \{\tilde{l}_1, \dots, \tilde{l}_j, \dots, \tilde{l}_m\}$ – множество индексов месяцев эксплуатации, где \tilde{l}_j – индекс j -го месяца, $\tilde{l}_j \in Z$;
- 4) m – кол-во месяцев, $m \in Z$;
- 5) $\text{Dis} = \{dis_1, \dots, dis_i, \dots, dis_d\}$ – множество протяженностей частей маршрута для каждого i -го региона плавания;
- 6) d – кол-во регионов плавания, ед., $d \in Z$;
- 7) $Rt = \{rt_1, rt_2, rt_3\}$ – множество маршрутов поставок;
- 8) V_k – матрица эксплуатационных скоростей, соответствующая k -ому

газовозу:
$$\begin{bmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1j} & \cdots & v_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ v_{i1} & \cdots & v_{ij} & \cdots & v_{im} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{d1} & \cdots & v_{dj} & \cdots & v_{dm} \end{bmatrix}_{k, d \times m}, \text{ где } v_{ij} \text{ – значение ожидаемой}$$

эксплуатационной скорости, соответствующее i -му региону в j -ом месяце у k -го газовоза, без учета ветро-волнового режима узлов;

- 9) Cons – матрица значений потребления СПГ:

$$\begin{bmatrix} cons_{11} & \cdots & cons_{1j} & \cdots & cons_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ cons_{l1} & \cdots & cons_{lj} & \cdots & cons_{lm} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ cons_{u1} & \cdots & cons_{uj} & \cdots & cons_{um} \end{bmatrix}_{uxm}, \text{ где } cons_{lj} \text{ – значение планируемого}$$

уровня потребления l -го потребителя в j -ом месяце, $\text{м}^3/\text{сут}$;

10) $Cons_{max}$ – множество максимальных значений часового потребления СПГ, не связанное с основной матрицей потребления СПГ: $\{cons_{max_1}, \dots, cons_{max_l}, \dots, cons_{max_u}\}$, где $cons_{max_l}$ – значение максимального часового потребления l-го потребителя, м³/ч;

11) T_{fk} – множество затрат времени на формальности в портах рейса k-го газовоза в зависимости от месяца, ч.: $\{t_{f1}, \dots, t_{fj}, \dots, t_{fm}\}_k$, где t_{fjk} – затраты времени на формальности в порту k-ым газовозом в j-ом месяце, ч;

12) Var_{LNG_k} - доля испаряемого СПГ во время хода k-го газовоза, доля;

13) C_{voyage} – множество оценочных значений удельных затрат по содержанию газовоза в сутки хода в грузу, руб./сут.: $\{c_{voyage_1}, \dots, c_{voyage_k}, \dots, c_{voyage_\tau}\}$, где $c_{voyage_k} \in R$ – оценочное значения удельных затрат по содержанию k-го газовоза;

14) $C_{ballast}$ – множество оценочных значений удельных затрат по содержанию газовоза в сутки хода в балласте, руб./сут.: $\{c_{ballast_1}, \dots, c_{ballast_k}, \dots, c_{ballast_\tau}\}$, где $c_{ballast_k} \in R$ – оценочное значения удельных затрат по содержанию k-го газовоза;

15) C_{idle} – множество оценочных значений удельных затрат по содержанию газовоза в сутки стоянки, руб./сут.: $\{c_{idle_1}, \dots, c_{idle_k}, \dots, c_{idle_\tau}\}$, где $c_{idle_k} \in R$ – оценочное значения удельных затрат по содержанию k-го газовоза;

16) $Cost_{ves_k}$ – множество строительных стоимостей k-го газовоза, руб.: $\{cost_{ves_1}, \dots, cost_{ves_k}, \dots, cost_{ves_\tau}\}$, где $cost_{ves_k} \in R$ – строительная стоимость k-го газовоза;

17) $Cost_{st}$ – множество строительных стоимостей ПлХГ, руб.: $\{cost_{st_1}, \dots, cost_{st_{\tilde{s}}}, \dots, cost_{st_{\tilde{\tau}}}\}$, где $cost_{st_{\tilde{s}}} \in R$ – строительная стоимость \tilde{s} -го ПлХГ;

18) $T_{ballast_k}$ – общая продолжительность времени пребывания k-го газовоза на ходу в балласте, ч.;

19) T_{idle_k} – общая продолжительность времени пребывания k-го газовеца в стоянке, ч.;

20) T_{earr} – переменное множество времен прибытия газовецов: $\{t_{earr_1}, \dots, t_{earr_{\tilde{k}}}, \dots, t_{earr_n}\}$, где $t_{earr_{\tilde{k}}}$ – значение модельного времени прибытия газовеца \tilde{k} из всех n газовецов, находящихся в пути к порту назначения, ч.;

21) $Cap_{st_{\tilde{s}}}$ – вместимость \tilde{s} -го ПлХГ, м³;

22) Cap_{ves_k} – вместимость k-го газовеца, м³;

23) Ω – множество динамического размера σ моментов времени, в которые был определен таймер: $\{\omega_1, \dots, \omega_\rho, \dots, \omega_\sigma\}$, где ω_ρ – ρ -ый момент времени, когда был определен промежуток времени до следующего отправления, ч;

24) $T_{calcarr}$ – множество фактических значений продолжительности времени с момента отправления газовеца к моменту выгрузки: $\{t_{calcarr_1}, \dots, t_{calcarr_{\varphi_k * k}}\}$, где $\varphi_k * k$ – число рейсов k судов, эксплуатируемых на рассматриваемой линии.

2.1.2. Функционал модели

1) V_{min_l} – неснижаемый запас СПГ на складе при 1-ом потребителе, м³: $0.03 * Cap_{st} + Cons_{max_l} * 24 * 3$;

2) T_{voyage_k} или $T_{ballast_k}$ – продолжительность хода k-го газовеца в грузу или в балласте, час.: $\sum_{i=1}^d \frac{dis_i}{v_{ijk}}$;

3) T_{ev_k} – ожидаемая продолжительность хода k-го газовеца в грузу, ч = T_{voyage_k} ;

4) T_{elu_k} – ожидаемая продолжительность погрузо-разгрузочных работ, ч, $= T_{load/unload}$;

5) $\tilde{G}(t) = \tilde{i}_j, \tilde{G}: R \rightarrow Z$ – функция, заданная таблицей значений, возвращающая индекс месяца в зависимости от задаваемого модельного времени;

6) $\tilde{J}(\tilde{i}_j) = \tilde{t}_j, \tilde{J}: Z \rightarrow R$ – функция, возвращающая количество часов в месяце по его индексу;

$$7) T_{del} = \begin{cases} T_{ev_k} + 2 * T_{elu_k} + \frac{t_{fjk}}{2}, & t < t_{earr_1}, \text{ – продолжительность} \\ \overline{T_{calcarr}}, & \text{иначе} \end{cases}$$

времени с момента отправления газовеа к моменту выгрузки, ч;

8) $LNG_{ev} = (1 - T_{ev_k} * Var_{LNG_k}) * (Cap_{ves_k} * 98\%)$ – плановый объем выгружаемого СПГ в ПлХГ, м³;

9) $LNG_{st_{\hat{t}}} = LNG_{st_t} + sgn(n) * LNG_{ev} - \frac{cons_{lj}}{24} \min \left[\tilde{J}(\tilde{G}(t)) - t, T_{del} \right] - \frac{cons_{lj+1}}{24} \left(T_{del} - \min \left[\tilde{J}(\tilde{G}(t)) - t, T_{del} \right] \right)$ – объем СПГ в ПлХГ через промежуток времени \hat{t} от момента времени t , м³/сут.;

$$10) LNG_{uv} = \begin{cases} Cap_{st_{\hat{s}}} - LNG_{st_{tt}}, & Cap_{st_{\hat{s}}} - LNG_{st_{tt}} < LNG_{ev} \\ LNG_{ev}, & \text{иначе} \end{cases} \quad -$$

фактический объем выгружаемого СПГ, м³;

11) $T_{load/unload}$ – продолжительность загрузки/разгрузки к-го газовеа:
 $\frac{LNG_{uvk} * 98\%}{\sum_{\mu=1}^{\Theta} NPump_{\mu k} * PPump_{\mu k}}$, где $NPump_{\mu k}$ и $PPump_{\mu k}$ – число и производительность μ -го насоса из Θ насосов к-го газовеа соответственно;

$$12) N_{req_j} = \sum_{k=1}^{\tau} \left(1 - \frac{T_{idle_k}}{\tilde{J}(\tilde{i}_j)} \right) \text{ – потребное число судов за } j\text{-ый месяц, ед.}$$

13) t_{bdep} – продолжительность времени между отправлениями к-го и к+1-го газовеа. Для описания данной функции введем следующие условные обозначения:

$$a) \frac{LNG_{st_t} - V_{min}}{cons_{l1}/24} = A \text{ – продолжительность времени потребления}$$

пополняемого объема (который остается после вычитания из максимального уровня неснижаемого) СПГ, который имеется на t -ый момент времени, при l -ом потребителе, час.;

$$b) \frac{(LNG_{uv} - (\tilde{t}_j - t_{arr_\tau}) * cons_{lj} / 24)}{cons_{lj+1} / 24} = B - \text{продолжительность времени}$$

потребления того объема СПГ, который будет выгружен τ -ым судном в за конец j -го месяца и за начало $j+1$ -го месяца, при 1-ом потребителе, час.;

$$c) \frac{\left(Cap_{st} - V_{min_l} - \frac{(\tilde{t}_j - t_{earr_1}) * cons_{lj}}{24} \right)}{cons_{lj+1} / 24} = C - \text{продолжительность}$$

потребления того пополняемого объема СПГ, который будет после прибытия ближайшего идущего к ПлХГ газовоза, за конец j -го месяца и за начало $j+1$ месяца до достижения неснижаемого объема СПГ в ПлХГ, при 1-ом потребителе, час.;

$$d) \frac{\left(LNG_{st_t} - \frac{(t_{earr_1} - t) * cons_{lj}}{24} + LNG_{uv} - V_{min_l} - \frac{(\tilde{t}_j - t_{earr_1}) * cons_{lj}}{24} \right)}{cons_{lj+1} / 24} = D -$$

продолжительность времени потребления пополняемого СПГ на t -ый момент времени до прибытия ближайшего идущего до ПлХГ газовоза и выгруженного этим судном объема СПГ до достижения неснижаемого уровня СПГ за конец j -го месяца и за начало $j+1$ -го месяца при 1-ом потребителе, час.;

$$e) \frac{(t_{earr_1} - t) * cons_{lj}}{24} = E - \text{объем СПГ, который будет потреблен до}$$

прибытия ближайшего идущего до ПлХГ газовоза в j -ом месяце 1-ым потребителем, m^3 ;

f) $\tilde{G}(t + T_{ev_k}) = F$ - индекс месяца, в котором к ПлХГ прибудет k -ое судно;

$$g) \tilde{G}\left(t + T_{ev_k} + \frac{LNG_{uv}}{cons_{lj} / 24}\right) = G - \text{индекс месяца, в котором будет}$$

потреблена партия СПГ 1-ым потребителем в j -ом месяце, выгруженная k -ым судном при выходе в эксплуатацию в момент времени t .

Само представление расчета t_{bdep} представлено в виде системы:

$$\begin{cases}
A - T_{del}, & t = 0 \quad (1) \\
\tilde{t}_i - t - T_{del} + B, & F \neq G \cap \tau > 1 \quad (2) \\
t_{\text{крит}}, & F \neq G \cap LNG_{st_t} - E + LNG_{uv} > Cap_{st} \cap \tilde{t}_j - t - T_{del} + C > 30.5 * 24 \quad (3) \\
t_{\text{крит}}, & F \neq G \cap \tilde{t}_i - t - T_{del} + D > 30.5 * 24 \quad (4) \\
\tilde{t}_j - t - T_{del} + C, & F \neq G \cap LNG_{st_t} - E + LNG_{uv} > Cap_{st} \quad (5) \\
\tilde{t}_j - t - T_{del} + D, & F \neq G \quad (6) \\
\frac{LNG_{uv}}{cons_{lj+1}/24}, & F \neq \tilde{G}(t) \quad (7) \\
\frac{LNG_{uv}}{cons_{lj}/24}, & \text{иначе} \quad (8)
\end{cases}$$

Приведем описание рассматриваемых случаев расчета продолжительности времени между отправлением k-го и k+1-го газовоза.

Первый случай расчета соответствует начальному моменту времени работы имитационной модели.

Второй случай расчета соответствует такому состоянию имитационной модели, когда месяцы прибытия газовоза и прогнозируемое потребление его выгружаемой партии СПГ различны, а также при эксплуатации в текущем месяце более 1 газовоза.

Третий случай расчета соответствует такому состоянию имитационной модели, когда: месяцы прибытия газовоза и прогнозируемое потребление его выгружаемой партии СПГ различны; объем СПГ, который будет поставлен на ПлХГ после отправления газовоза с полной загрузкой в момент времени t, может превысить вместимость ПлХГ; срок потребления пополняемого объема СПГ превышает 1 месяц.

Четвертый случай расчета соответствует такому состоянию имитационной модели, когда: месяцы прибытия газовоза и прогнозируемое потребление его выгружаемой партии СПГ различны; срок потребления пополняемого объема СПГ, поставляемого при прогнозе (осуществляемом в момент времени t) прибытия газовоза, превышает 1 месяц.

Пятый случай расчета соответствует такому состоянию имитационной модели, когда: месяцы прибытия газовоза и прогнозируемое потребление его выгружаемой партии СПГ различны; объем СПГ, который будет поставлен

на ПлХГ после отправления газовоза с полной загрузкой в момент времени t , может превысить вместимость ПлХГ.

Шестой случай расчета соответствует такому состоянию имитационной модели, когда месяцы прибытия газовоза и прогнозируемое потребление его выгружаемой партии СПГ различны.

Седьмой случай расчета соответствует такому состоянию имитационной модели, когда месяц прибытия газовоза и текущий месяц различны.

В иных состояниях имитационной модели t_{bdep} рассчитывается по 8-му случаю.

14) $LNG_{st_t} = LNG_{st_{t-1}} - \frac{(\omega_1 + t_{bdep} - t) * cons_{lj}}{24} + \max\{0; t - (\omega_1 + t_{bdep}) + 1\} * LNG_{uv}$ – динамическое уравнение Р. Беллмана, определяющее уровень СПГ в ПлХГ в момент времени t , при условии, что ω_1 и t_{bdep} обновляются в момент отправления какого-либо из газовозов к порту назначения: $\omega_1, t_{bdep} \neq const$.

2.2. Построение имитационной модели снабжения плавучего хранилища газа

Рассмотрим программную имплементацию используемых методов моделирования в среде AnyLogic (на языке программирования Java). AnyLogic является единственным отечественным ПО, сочетающим системную динамику, агентный и дискретно-событийные виды имитационного моделирования с возможностью сопровождения выполнения модели 2D и 3D визуализацией. Поэтому AnyLogic был выбран в качестве базы для разработки компьютерной имитационной транспортной модели.

В имитационной модели, проектируемой средствами ПО AnyLogic, использованы дискретно-событийный (моделирование погрузо-разгрузочных работ) и агентный (моделирование алгоритма эксплуатации газовозов) виды имитационного моделирования.

Исходные данные для работы модели (технико-эксплуатационные характеристики газовозов, технические характеристики ПлХГ, уровни спроса по месяцам и т.д.) представлены в виде таблиц формата *.xlsx, находящихся в папке размещения модели, к которым ссылается модель при каждом запуске.

2.2.1. Дискретно-событийное моделирование портового комплекса

Порт в имитационной модели представляет собой агента или класс – совокупность объектов, методов и функций (рис. 14).

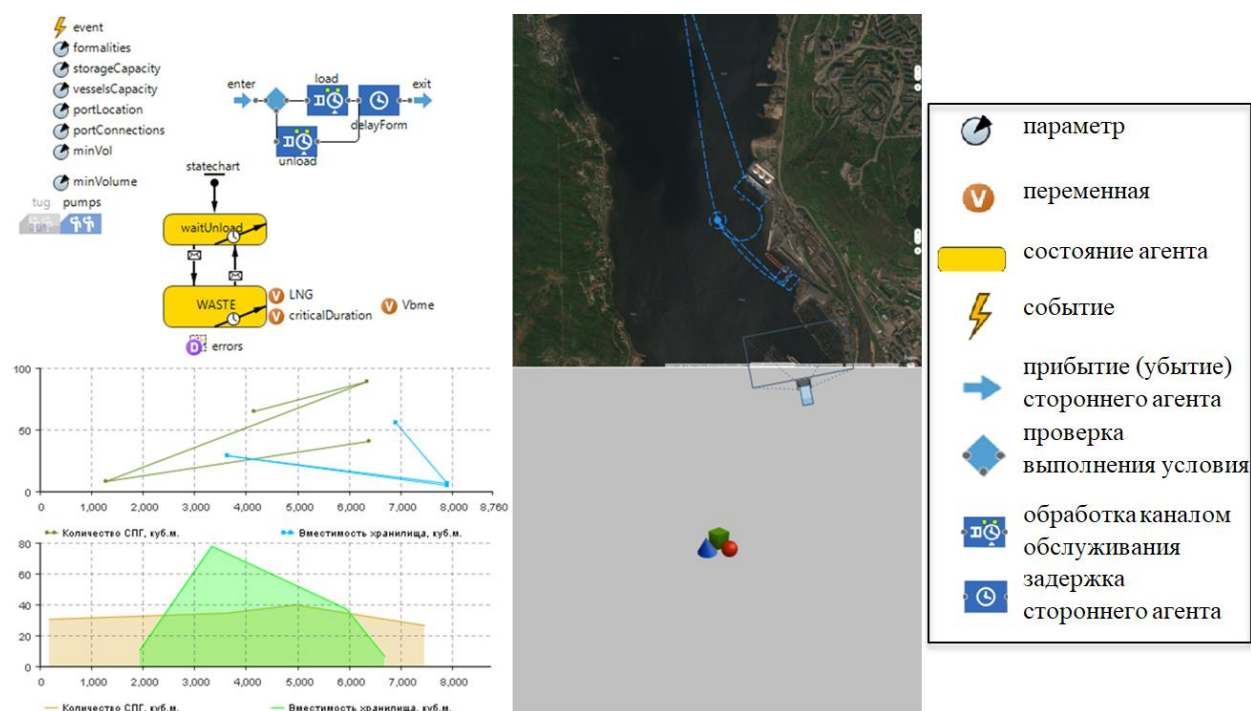


Рисунок 14 – Структура алгоритма работы порта в дискретно-событийной и агентной реализациях

Параметры представляют собой технические характеристики ПлХГ, загружаемые из внешних файлов в виде таблиц значений.

Переменные являются показателями работы ПлХГ, которые меняются в зависимости от его состояния.

Состояние обозначает состояния, в которых агент (порт) находится в определенный момент модельного времени, и обладает следующими свойствами: наименование, действие при входе в состояние, действие при выходе из состояния. Переход агента между состояниями может

осуществляться с заданной интенсивностью, при выполнении условия, по тайм-ауту и т.д.

Событие – выполнение определенного кода по истечении тайм-аута, выполнении условия и пр.

Дискретно-событийные блоки кода представлены в виде отдельных операций, где прибытие (убытие) стороннего агента – прибытие (убытие) газовоза в порт, проверка выполнения условия - направление газовоза на погрузку или загрузку в зависимости от цели его прибытия, обработка каналом обслуживания – проведение погрузо-разгрузочных работ с газовозом, задержка стороннего агента - ожидание газовоза в порту для решения логистических формальностей.

Потребление СПГ в ПлХГ симулируется посредством циклично выполняемого кода 1 раз в модельный час. Для удобства пользователя на диаграмме работы порта также представлены графики наличия СПГ в ПлХГ (рисунок 14).

Таким образом, в верхнем левом углу окна уровня моделирования порта (рисунок 14) расположены основное тело моделирования (параметры и событие, дискретно-событийные блоки, состояния порта). В нижнем левом углу – графики наличия СПГ в ПлХГ, по оси абсцисс которых – модельное время (час.), по оси ординат – уровень объема СПГ (м^3). В правой части окна расположены 2D (вверху) и 3D (окно и камера внизу) окна визуализации транспортных процессов в акватории порта Мурманск.

2.2.2. Построение геоинформационной среды модели

Каждому из портов в модели заданы координаты в геоинформационной среде (далее – GIS), маршруты до которых пролегают через районированные участки мирового океана (рисунок 15).



Рисунок 15 – Геоинформационная среда модели

Каждому из представленных на рисунке 15 районов поставлены в соответствие записи специально созданной в AnyLogic таблице, определяющие максимальную эксплуатационную скорость для каждого из типов газовозов. Данные районы занимают определенную площадь на GIS-карте – пространстве геоинформационных координат, загружаемых с серверов AnyLogic.

2.2.3. Агентное моделирование эксплуатации газовозов

Газовоз в данной модели представляет собой агента или класс – совокупность объектов, методов и функций (рис. 16).

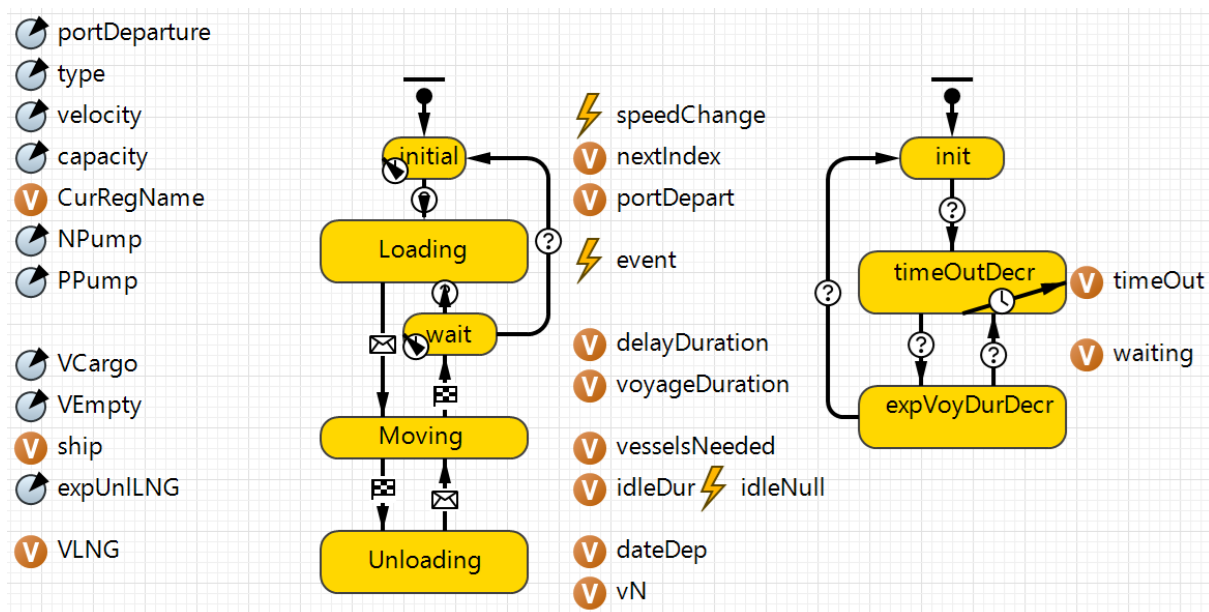


Рисунок 16 – Структура алгоритма эксплуатации газовоза в агентной реализации

Все элементы соответствуют описанию, приведенному в п. 2.3.2. Работа газовозов на линии построена по разработанному в данной работе алгоритм «умного конвейера», который определяет для каждого агента-газовоза необходимый промежуток времени до начала рейса следующего газовоза. Таким образом, расписание работы газовозов определяется динамически на всем протяжении работы модели. В общем виде алгоритм эксплуатации газовоза в рамках системы «умного конвейера» выглядит следующим образом:

1) в состоянии initial в порте отправления находится весь флот доступных заказчику газовозов, который представляет собой коллекцию агентов с определенными для них индексами. В момент запуска модели алгоритм работы газовоза с индексом 0 рассчитывает для этого газовоза промежуток времени (далее – устанавливает таймер), через который газовоз должен выйти в эксплуатацию, чтобы к моменту его выгрузки в г. Мурманск в ПлХГ остался неснижаемый уровень СПГ (далее – «условие своевременной поставки»);

2) в момент выхода в эксплуатацию (начало загрузки газовоза – состояние Loading) алгоритм работы газовоза с индексом 0 устанавливает для этого газовоза до следующего отправления из порта Высоцк, который

удовлетворяет «условию своевременной поставки», согласно методике расчета из теории управления запасами;

3) состояние Moving соответствует ходу газове́за из порта отправления в г. Мурманск, во время которого скорость хода меняется в зависимости от региона плавания;

4) состояние Unloading соответствует выгрузке газа в г. Мурманск, с переходом в которое газове́з перенаправляется в диаграмму дискретно-событийного моделирования порта. По окончании всех погрузо-разгрузочных работ и формальностей в порту газове́з покидает блоки работы порта;

5) в зависимости от того, в каком из состояний газове́за обнулится таймер, установленный на шаге 2), выполняется код, согласно которому алгоритм работы текущего газове́за определяет местоположение этого газове́за в GIS-пространстве: в случае, если газове́з не находится на территории порта отправления, алгоритм его работы вызывает газове́з из состояния Initial со следующим индексом (в нашем случае – 1), который находится на территории порта отправления. В дальнейшем, алгоритм работы следующего газове́за аналогичен и начинается с шага 2. В противном случае, текущий газове́з становится на загрузку в порте отправления и алгоритм его работы возвращается к шагу 2;

6) по прибытии в порт отправления все газове́зы, имеющие нулевой таймер, возвращаются в состояние initial, поскольку данное условие означает их ненужность в эксплуатации в рамках рассматриваемого рейса.

Также, на уровне класса газове́за присутствует функция speedChange, которая меняет скорость газове́за каждые 3 часа в зависимости от того, в каком регионе он находится. Учет влияния (снижения скорости в узлах) ветро-волнового режима на скорость хода газове́за по каждому региону плавания реализован по формуле 12 [9]. Для правильного использования данной формулы необходимо полученные из таблицы направления бега ветровых волн углы в градусах (см. п. 1.2.2) сопоставить с направлением

хода судна для получения курсового угла бега волн, который затем должен быть переведен в радианы:

$$\Delta V = \frac{0,01 * V_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{5 * q_w}{\pi}\right)^2}} * \left(\frac{175 * h_z * \sqrt{h_z}}{L} + 0,32 * h_z^2 \right), \quad (12)$$

где h_z – высота волны, м, V_0 – скорость движения судна в спокойной воде, узл., q_w – курсовой угол бега волн, рад., L – длина судна, м.

Построение допустимого расписания (соответствующего системе ограничений 2) производится путем расчета продолжительности времени между отправлениями соседних по расписанию газозовов в эксплуатации на основе фактических значений продолжительности хода газозовов. Таким образом, ссылаясь на исторические значения (имеющуюся информацию о работе модели в прошлом) продолжительности хода газозовов на линии, алгоритм построения учитывает среднее значение потери скорости газозовов из-за влияния на их эксплуатацию ветро-волнового режима различных морских участков.

2.2.4. Имитационное моделирование ветро-волнового режима рассматриваемых регионов

Имитационное моделирование гидрометеорологических условий осуществляется в среде AnyLogic на уровне агента Main для того, чтобы в первую очередь генерировались погодные условия, после которых выполнялся код работы судна. На уровне агента Main помимо прочего размещены:

- 1) таблицы с результатами проведения прогноза в среде RStudio;
- 2) функции по генерации параметров ветро-волнового режима в соответствии с таблицами результатов из п.1 по каждому региону с шагом в 3 часа;
- 3) функция расчета потери скорости судна в зависимости от ветро-волнового режима в регионе, в котором оно находится.

Основу имитационного моделирования ветро-волновых режимов рассматриваемых морских участков составляют полученные в ходе анализа временных рядов модели, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Распределение моделей временных рядов по рассматриваемым морским участкам

Исследуемое явление Морской участок		Атмосферное давление	Векторная скорость ветра	Векторная скорость ветровых волн	Высота и период ветровых волн
Балтийское море	1 участок	ADL(4,8)	VARX(3,5)	Модель многомерной линейной регрессии в зависимости от скорости ветра	Эмпирическая модель высоты волн в зависимости от скорости ветра
	2 участок	ADL(4,8)	VARX(3,5)		
	3 участок	ADL(4,8)	VARX(2,3)		
	4 участок	ADL(4,8)	VARX(3,4)		
	5 участок	ADL(4,8)	VARX(4,3)		
	6 участок	ADL(4,8)	VARX(4,6)		
	7 участок	ADL(3,8)	VARX(4,6)		
Северное море	1 участок	ADL(4,8)	VARX(6,4)	VARX(4,6)	VARX(4,5)
	2 участок	ADL(4,8)	VARX(3,6)	VARX(4,5)	VARX(4,1)
	3 участок	ADL(4,8)	VARX(2,7)	VARX(4,6)	VARX(4,1)
Норвежское море	1 участок	SARIMA(4,1,4)(1,1,2)[8]	VARMA(2,6)	VARMA(1,3)	VARMA(2,2)
	2 участок	ADL(4,8)	VARX(4,5)	VARX(5,5)	VARX(4,5)
Баренцево море	1 участок	ADL(4,8)	VARX(4,7)	VARX(4,7)	VARX(4,7)
	2 участок	ADL(4,8)	VARX(4,6)	VARX(6,7)	VARX(4,1)
	4 участок	SARIMA(4,1,4)(0,1,1)[12]	VARMA(4,3)	VARMA(1,3)	VARMA(5,1)

2.2.5. Общий вид работы имитационной модели

Представим интерфейс проектируемой модели на текущей стадии разработки. Экран с выбором начальных данных представлен на рисунке 17. Перед запуском модели пользователь выбирает из выпадающего списка тип газовоза, целевого потребителя СПГ и порт отправления. Стоит отметить, что на данный момент выбор ПлХГ от пользователя закрыт в связи с ограничениями рассматриваемых вариантов транспортного снабжения

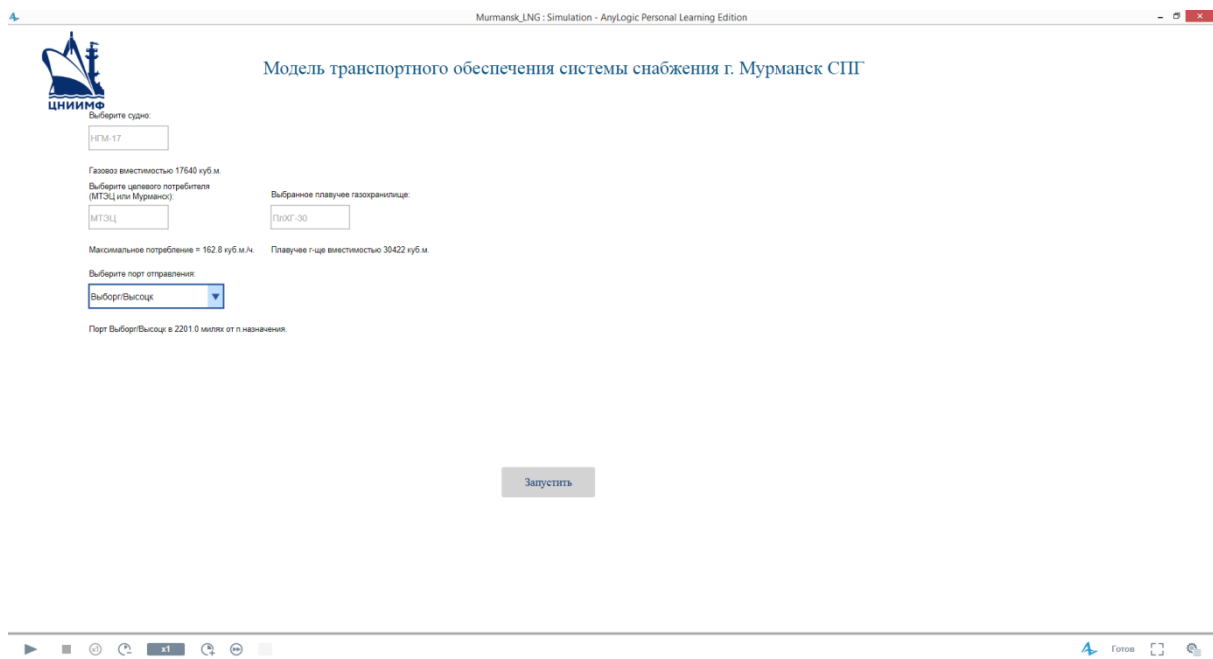


Рисунок 17 – Начальный экран имитационной модели

После выбора начальных условий и запуска модели открывается окно геинформационной системы с графиками потребления и наличия газа в хранилище (рис.18,19), которое также представлено в фирменном стиле АО «ЦНИИМФ».

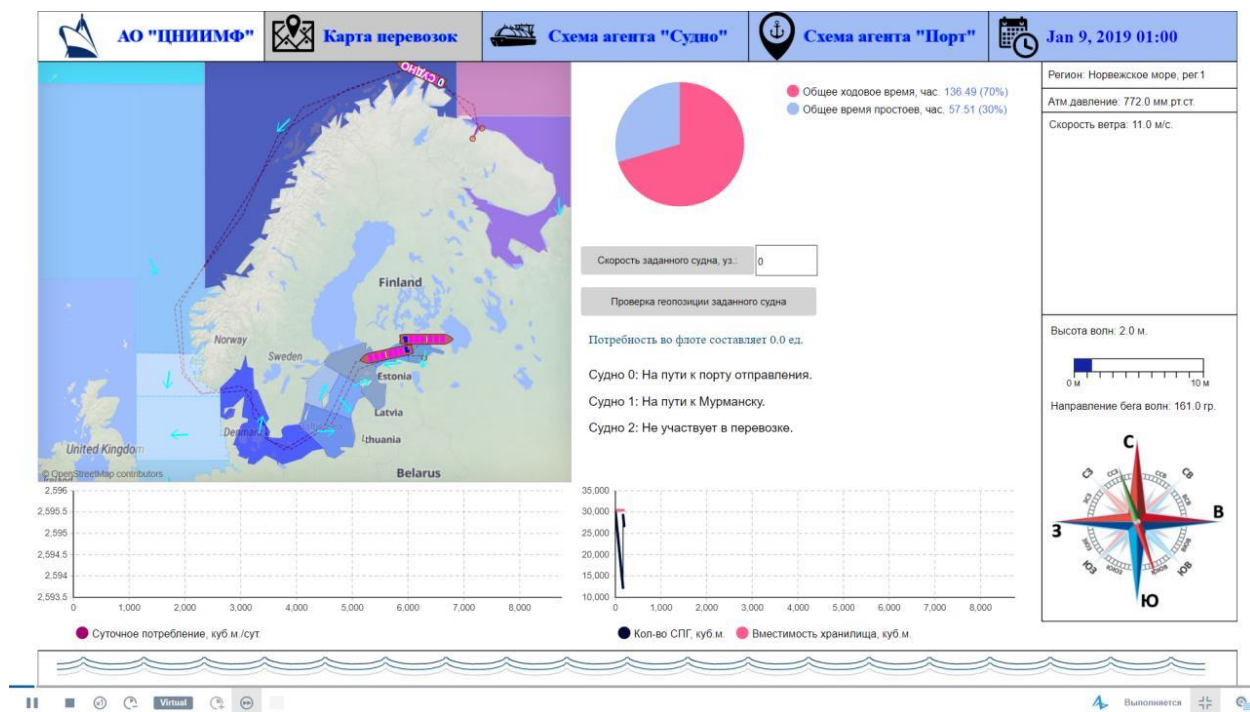


Рисунок 18 – Главное окно имитационной модели

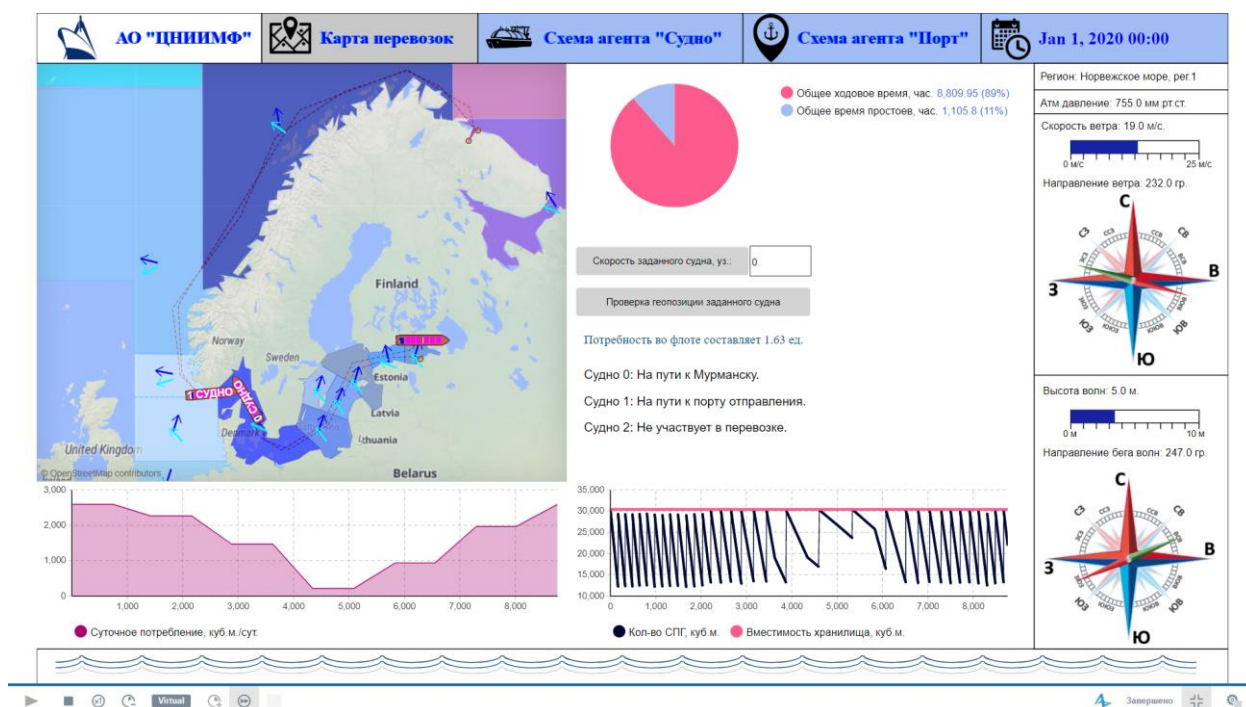


Рисунок 19 – Результаты прогона имитационной модели на протяжении 1 года

Как видно из рисунка 19, во время работы модели пользователю доступна информация о структуре эксплуатационного времени газозовов с начала запуска модели до текущего момента времени, потребность во флоте за предшествующий месяц, информация о состоянии $t+1$ газозовов относительно эксплуатации. С целью увеличения информативности главного окна имитационной модели в нем также присутствуют графики уровня суточного потребления СПГ и уровня СПГ в ПлХГ. По завершении прогона имитационной модели на жесткий диск в папку имитационной модели выгружается файл формата *.xlsx со сформированным расписанием эксплуатации газозовов (таблица 2).

Таблица 2 – Расписание рейсов условных газозовов вместимостью 17 640 м³ на линии Выборг/Высоцк - Мурманск

№ рейса	Газовоз №1		Газовоз №2	
	дата отправления	дата прибытия	дата отправления	дата прибытия
1	02.01.2019 1:12	07.01.2019 14:14		
2			08.01.2019 15:13	14.01.2019 4:03
3	15.01.2019 5:15	20.01.2019 18:10		
4			21.01.2019 19:22	27.01.2019 8:34
5	28.01.2019 13:25	03.02.2019 2:16		
6			04.02.2019 14:41	10.02.2019 3:43
7	11.02.2019 15:47	17.02.2019 4:37		

№ рейса	Газовоз №1		Газовоз №2	
	дата отправления	дата прибытия	дата отправления	дата прибытия
8			18.02.2019 16:52	24.02.2019 5:50
9	25.02.2019 21:53	03.03.2019 10:41		
10			05.03.2019 10:56	10.03.2019 23:47
11	12.03.2019 23:57	18.03.2019 12:54		
12			20.03.2019 13:08	26.03.2019 2:03
13	28.03.2019 14:09	03.04.2019 3:15		
14			06.04.2019 21:17	12.04.2019 10:08
15	16.04.2019 4:25	21.04.2019 17:11		
16			25.04.2019 11:31	01.05.2019 0:30
17	07.05.2019 3:04	12.05.2019 15:58		
18			18.05.2019 18:17	24.05.2019 7:02
19			05.06.2019 16:17	11.06.2019 5:10
20			06.07.2019 4:17	11.07.2019 17:06
21			05.08.2019 16:17	11.08.2019 5:05
22			05.09.2019 4:17	10.09.2019 17:11
23			23.09.2019 10:17	28.09.2019 23:09
24	05.10.2019 1:18	10.10.2019 14:16		
25			15.10.2019 15:25	21.10.2019 4:31
26	26.10.2019 5:27	31.10.2019 18:31		
27			03.11.2019 23:45	09.11.2019 12:52
28	12.11.2019 15:46	18.11.2019 4:52		
29			21.11.2019 7:50	26.11.2019 20:45
30	29.11.2019 11:53	05.12.2019 0:43		
31			07.12.2019 4:56	12.12.2019 17:55
32	14.12.2019 21:57	20.12.2019 10:54		
33			22.12.2019 14:59	28.12.2019 3:50

2.3. Оптимизация морской транспортной системы снабжения сжиженным природным газом г. Мурманск

Оптимизация морской транспортной системы снабжения сжиженным природным газом г. Мурманск и Мурманской области в настоящем исследовании заключается в определении для каждого варианта потребления такого типа газовоза, ПлХГ и маршрута поставок, которые бы отвечали минимуму совокупных затрат на реализацию проекта рассматриваемой транспортной системы.

Для этого, используя алгоритм умного конвейера, имитационная модель строит допустимое расписание эксплуатации газовозов, при котором выполняется система ограничений (формула 2). Стоит отметить, что для различных типов газовозов, ПлХГ и различных маршрутов поставок строится индивидуальное допустимое расписание. По каждому из вариантов потребления СПГ определяется оптимальный тип газовоза, ПлХГ и маршрут поставок, которые бы сводили совокупные затраты проекта к минимуму.

Рассматривается 2 варианта потребления СПГ. Для каждого из них рассматривается 9 вариантов функционирования морской транспортной системы снабжения сжиженным природным газом г. Мурманск – для каждого варианта технологической схемы по каждому из рассматриваемых маршрутов поставки:

1. Варианты технологической схемы:

- a. Вариант 1 технологической схемы: газовоз вместимостью 7 350 м³, соответствующее ему хранилище;
- b. Вариант 2 технологической схемы: газовоз вместимостью 17 640 м³, соответствующее ему хранилище;
- c. Вариант 3 технологической схемы: газовоз вместимостью 22 635 м³, соответствующее ему хранилище;

2. Варианта маршрутов:

- a. Вариант 1 маршрута поставки: Выборг/Высоцк – Мурманск (расстояние 2 201 м.миль);

б. Вариант 2 маршрута поставки: Усть-Луга – Мурманск (расстояние 2 176 м.миль);

с. Вариант 3 маршрута поставки: о. Кильдин/губа Ура – Мурманск (расстояние 56 м.миль);

3. Варианты потребления:

а. Вариант 1 потребления СПГ: Мурманская ТЭЦ;

б. Вариант 2 потребления: Мурманская ТЭЦ и перспективные потребители Мурманской области.

В зависимости от вариантов функционирования морской транспортной системы отдельно для каждого варианта потребления СПГ будет меняться как число потребных в эксплуатации газозовов, так и суточные расходы в сутки хода с грузом, в сутки хода порожнем и в сутки стоянки, поскольку будут меняться типы задействованных газозовов. В связи с этим смена допустимого расписания, типа газозовов, ПлХГ и маршрута поставок будет оказывать влияние на значение целевой функции (формула 1).

Оптимизация морской транспортной системы проводится путем прогона имитационной модели по каждому из рассматриваемых вариантов функционирования, по результатам которых пользователю возвращаются параметры варианта морской транспортной системы, отвечающего минимуму совокупных затрат, для каждого из вариантов потребления. Также пользователь может получить результаты работы модели по каждому прогону. Некоторые результаты прогона имитационной модели по всем вариантам представлены в таблицах 3 и 4, где первая цифра варианта указывает на вариант технологической схемы, а вторая – на вариант маршрута поставок:

Таблица 3 – Некоторые результаты прогонов имитационной модели морской транспортной системы снабжения СПГ г. Мурманск при первом варианте потребления

Показатель работы модели Вариант функционирования транспортной системы	Среднемесячная потребность в газозовах, ед.	Средняя загрузка судна, %	Совокупные затраты функционирования морской транспортной системы, у.е.
Вариант 1.1	0,347	94,99	11547,3

Показатель работы модели Вариант функционирования транспортной системы	Среднемесячная потребность в газовозах, ед.	Средняя загрузка судна, %	Совокупные затраты функционирования морской транспортной системы, у.е.
Вариант 1.2	0,351	95,32	11532,6
Вариант 1.3	0,305	93,79	2858,6
Вариант 2.1	1,175	88,31	11284,37
Вариант 2.2	1,182	89,96	11286,47
Вариант 2.3	0,407	76,18	5418
Вариант 3.1	0,861	85,52	7106,41
Вариант 3.2	0,866	86,63	7121,71
Вариант 3.3	0,136	71,07	6521

Таблица 4 – Некоторые результаты прогонов имитационной модели морской транспортной системы снабжения СПГ г. Мурманск при втором варианте потребления

Показатель работы модели Вариант функционирования транспортной системы	Среднемесячная потребность в газовозах, ед.	Средняя загрузка судна, %	Совокупные затраты функционирования морской транспортной системы, у.е.
Вариант 1.1	8,117	96,00	26741,76
Вариант 1.2	8,241	97,23	26714,02
Вариант 1.3	0,775	96,03	3259,22
Вариант 2.1	3,342	92,12	23302,45
Вариант 2.2	3,564	93,10	23283,17
Вариант 2.3	0,325	81,19	5891,56
Вариант 3.1	1,858	89,52	14656,8
Вариант 3.2	1,901	89,85	14641,04
Вариант 3.3	0,217	78,25	7000,14

По результатам прогонов имитационной модели были получены следующие оптимальные с точки зрения минимума совокупных затрат варианты технологической линии морской транспортной системы снабжения сжиженным природным газом г. Мурманск:

1) Для первого варианта потребления – вариант технологической линии 1.3, однако в случае невозможности поставок СПГ по варианту маршрута №3 будет выбран вариант технологической линии 3.1;

2) Для второго варианта потребления – вариант технологической линии 1.3, однако в случае невозможности поставок СПГ по варианту маршрута №3 будет выбран вариант технологической линии 3.2.

Полученные результаты работы имитационной транспортной модели соответствуют результатам технико-экономического обоснования (ТЭО) [49], выполненного согласно техническому заданию заказчика АО «ЦНИИМФ». Среднее относительное отклонение значений показателей работы модели от оценок параметров транспортной системы снабжения сжиженным природным газом в ТЭО составляет 8,58%, наибольшее отклонение (по потребности в судах при варианте 3.3 1-го варианта потребления) – 14,55%.

Выводы

Целью настоящей работы являлась оптимизация проекта транспортной системы газоснабжения г. Мурманск и Мурманской области с использованием морского транспорта по критерию минимума совокупных затрат.

С точки зрения экономики эксплуатации морского транспорта была сформирована целевая функция совокупных затрат. Согласно требованиям к проекту транспортной системы газоснабжения была составлена система ограничений.

По результатам анализа научной литературы в сфере имитационного моделирования (в т.ч. по специфике водного транспорта) был разработан подход к созданию имитационной транспортной модели проекта морской транспортной системы снабжения сжиженным природным газом г. Мурманск. При построении имитационной транспортной модели использованы различные методы и алгоритмы, относящиеся, например, к теории управления запасами, анализу временных рядов, теории систем массового обслуживания, а также такие виды моделирования, как имитационное и аналитическое.

Построенная на основе разработанного подхода имитационная модель, учитывающая воздействие гидрометеорологических условий окружающей среды, прошла верификацию путем сравнительного анализа с результатами ТЭО [49].

При проведении экспериментов с использованием компьютерной имитационной модели найден оптимальный вариант технологической линии транспортной системы газоснабжения, представляющий собой набор из типа газовоза, типа ПлХГ и маршрута поставок.

Ближайшими перспективами являются:

- 1) модификация построенной имитационной модели путем внедрения алгоритма генерации ледовых явлений для учета влияния ледовых условий на эксплуатацию морского транспорта;

- 2) развитие в имитационной модели алгоритма работы порта при проведении погрузо-разгрузочных работ и швартовных операций путем

внедрения возможности учета характеристик конкретного служебного судна для повышения точности работы модели;

3) качественное расширение имитационной модели путем возможности оптимизации морской транспортной системы газоснабжения на множестве допустимых маршрутов поставок.

Заключение

Основными результатами выполнения выпускной квалификационной работы, выносимыми на защиту, являются:

1) сформулирован критерий качества, представляющий собой совокупные затраты на реализацию проекта транспортной системы газоснабжения г. Мурманск и Мурманской области в части морского транспорта;

2) разработан подход к созданию комплексной имитационной модели, описывающей эксплуатацию морского транспорта в системе газоснабжения под влиянием гидрометеорологических условий окружающей среды;

3) созданная на основе разработанного подхода компьютерная имитационная модель верифицирована с помощью сравнительного анализа с результатом проведения ТЭО [49];

4) найден оптимальный (в смысле сформулированного критерия качества) вариант технологической линии для каждого из вариантов потребления СПГ с использованием верифицированной компьютерной имитационной модели.

Список литературы

1. СП 350.1326000.2018 Нормы технологического проектирования морских портов/ М.: Стандартиформ, 2018. - 226 с.
2. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей// Российский морской регистр судоходства, 2006.
3. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей// Российский морской регистр судоходства, 2003.
4. Современный толковый коммерческо-транспортный словарь (в трех книгах). Книги 1-3. А-Я. – СПб., 2003. – 1264 с.
5. Muckstadt, John A., Sapra, Amar. Principles of Inventory Management, 2010. – 318 p.
6. Tsay (2014). Multivariate Time Series Analysis with R and Financial Applications. John Wiley. Hoboken, NJ.
7. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов: Прогноз и управление. М.: Мир, 1974. – 406 с.
8. Буре В.М. Прикладная статистика в R, STATISTICA и EXCEL. Описательная статистика. Оценивание параметров. Статистические критерии/В.М. Буре, Е.М. Парилина, А.А. Седаков, Е.В. Шевкопляс// учеб.пособие. – СПб., 2011. – 104 с.
9. Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управления движением судна. – 3-е изд., перераб. и доп.-Одесса: Фенікс, 2007. – С.101.
10. Железный, Г.М. Судоводителям. Что должен знать судоводитель: практическое пособие//Г.М. Железный. А.И. Задорожный, В.Н. Щербак. Одесса: КП ОГТ, 2005. – 445 с.
11. Кельтон В. Имитационное моделирование / В. Кельтон, А. Лоу // СПб.: Питер, 2004 – 847 с.

12. Переведенцев, Ю.П. Теория общей циркуляции атмосферы: учебное пособие / Ю.П. Переведенцев, И.И. Мохов, А.В. Елисеев и др. – Казань: Казан.ун-т, 2013. – 224 с.
13. Хеннан Э. Многомерные временные ряды. М.: Мир, 1974. – 217 с.
14. Ahrens, J.H., Dieter, U. Computer methods for sampling from Gamma, Beta, Poisson and binomial distributions, Springer-Verlag: Berlin, september, 1973
15. Banks, J.: Discrete event simulation, Proc. 1999 Winter Simulation Conference, Marietta, p.7-13 (1999)
16. David M. Stires, Maurice M. Murphy: Modern management methods PERT and CPM: program evaluation review technique and critical path method, Boston: Materials Management Institute, 294 p. (1963)
17. Hering, Amanda S. A Markov-Switching Vector Autoregressive Stochastic Wind Generator for Multiple Spatial and Temporal Scales/Amanda S. Hering, Karen Kazor, William Kleiber// Spatial and Temporal Variation of the Wind Resource, 12.02.2015. <https://www.mdpi.com/2079-9276/4/1/70/htm>
18. Izaskun, B.M., Garcia Morales, R.M., Marino, J., de los Santos, F.: A Decision Support Tool for Port Planning Based on Monte Carlo Simulation, Proc. 2018 Winter Simulation Conference, Las Vegas, D.C., 2018
19. Kulkarni, K., Trong Tran K., Wang, H., Chuin Lau H.: Efficient Gate System Operations for a Multi-Purpose Port Using Simulation-Optimization, Proc. 2017 Winter Simulation Conference, Las Vegas, D.C., 2017
20. Lahdelma, R., Salminen, P.: SMAA-2: Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis for Group Decision Making, Vol.- 49, 10.1287/opre.49.3.444.11220, Operations Research (2001)
21. Lukinskiy V. S., Panova Y., Soletskiy R. (2016). Simulation modelling of supply chain with allowance of reliability, Russian Journal of Logistics and Transport Management, Vol.3, No.2, 49–60.
22. Monge G. Mémoire sur la théorie des déblais et de remblais. Histoire de l'Académie Royale des Sciences de Paris, avec les Mémoires de Mathématique et de Physique pour la même année, pages 666—704, 1781

23. Pritsker, A.A.B. Introduction to simulation and Slam II. Forth edition. United States: N. p., 1995.
24. Russel, E.C.: Simulation and SIMSCRIPT II5, CACI, Inc., Los Angeles, 1976.
25. S. Chick, P.J. Sanchez, D.Ferrin, D.J. Morrice. Modelling ship arrivals in ports, Proc. 2003 Winter Simulation Conference , New-York, , D.C., 2003.
26. Schriber, T.J. An introduction to simulation using GPSS/H, New York: John Wiley, 1991.
27. Topaj A.G., Tarovik O.V., Bakharev A.A., Kondratenko A.A. Optimal ice routing of a ship with icebreaker assistance. Applied Ocean Research. No 86. 2019. pp. 177-187.
28. Бахарев А.А., Косоротов А.В., Крестьянцев А.Б., Таровик О.Б., Топаж А.Г. Повышение эффективности работы систем водного транспорта с помощью динамического имитационного моделирования // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. - 2015. - №№4 (59). - С. 33-36.
29. Глейм В. В. Имитационное моделирование морских грузовых терминалов на примере Новороссийского контейнерного терминала / В. В. Глейм // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем 2011». - СПб., 2011. - С. 55-58
30. Казьмина О.А., Карпенко А.А. Современные подходы к технологическому проектированию морских перегрузочных комплексов//В сборнике: Логистика: современные тенденции развития Материалы XVII Международной научно-практической конференции. 2018. С. 206-210.
31. Канторович, Г.Г. Анализ временных рядов// Лекционные и методические материалы. Экономический журнал ВШЭ, №1-4, 2002. – С. 81 – 523.
32. Карпенко А.А. Имитационное моделирование транспортной системы снабжения сжиженным природным газом города Мурманск и Мурманской

области//А.А. Карпенко, В сборнике: Транспорт России: проблемы и перспективы - 2019 материалы Международной научно-практической конференции. Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН. 2019. С. 199-203.

33. Китиков А.Н., Кузнецов А.Л., Русинов И.А. Расчёт морского фронта методами имитационного моделирования// Эксплуатация морского транспорта. – 2013. - №2. – с. 3-6.

34. Кузнецов А. Л. Имитационная модель в порту Тамань / А. Л. Кузнецов, И. М. Русу, М. Н. Горынцев [и др.] // Морские порты. - 2013. - № 7 (118).

35. Кузнецов А. Л. Роль имитационного моделирования в технологическом проектировании и оценке параметров грузовых терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. А. Погодин, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. - 2017. - № 2. - с. 93-102.

36. Кузнецов А.Л., Кайзер А. Имитационное моделирование для оценки влияния судопотока и дноуглубительных работ в подходном канале морского порта // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. - 2015. - №1. - С. 103-112.

37. Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Ткаченко А.С., Попоб Г.Б. Имитационное моделирование как инструмент расчета наземных контейнерных терминалов // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. - 2018. - №1. - С. 103-108.

38. Кукушкин И.В., Нырков А.П., Нырков А.А. Алгоритмическое и программное обеспечение имитационного моделирования процессов переработки каботажных грузов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2016. Выпуск 2(36). С.190-200.

39. Лукинский В.С., Панова Ю.Н. Имитационное моделирование стратегий управления запасами // Труды четвертой Международной научно-

практической конференции «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2017) // ISBN 978-5-902241-40-9 // АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», Санкт-Петербург, 2017. С. 71-75.

40. Семенов К.М. Методика систематизации процессов дискретно-событийной имитационной модели морского порта / К. М. Семенов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. - 2013. - № 2. - С. 184-192

41. Таровик О. В., Бахарев А. А., Топаж А. Г. и др. Имитационная модель работы флота как инструмент анализа эксплуатационных параметров судов и обоснования проектных решений // Науч.-техн. сб. Рос. мор. регистра судоходства. — 2015. — № 38/39. — С. 46—52

42. Таровик О. В., Косьмин М. С. Имитационное моделирование морских транспортных систем, работающих в ледовых условиях с соблюдением графика поставок// Судостроение, 2014, №1, С. 9–14

43. Таровик О.В., Топаж А.Г., Крестьянцев А.Б. Кондратенко А.А., Зайкин Д.А. Комплексная имитационная модель морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» // Арктика: экология и экономика. № 3 (27). 2017. С. 86-102.

44. Таровик О.В., Топаж А.Г., Крестьянцев А.Б., Кондратенко А.А. Моделирование систем арктического морского транспорта: основы междисциплинарного подхода и опыт практических работ // Арктика: экология и экономика, № 1 (25), 2017. С.86-101.

45. Тимченко В.С. Перспективы применения имитационного моделирования, при оценке мероприятий по развитию транспортного комплекса Арктической зоны РФ // Интернет-журнал «Мир науки» 2015 №1 <http://mir-nauki.com/PDF/08EMN115.pdf>

46. Топаж А. Г., Таровик О. В., Косоротов А. В., Бахарев А. А. Программный комплекс имитационного моделирования для проектирования и анализа морских транспортных систем. // Тр. 3-й междунар. науч.-практич.

конф. «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем (ИКМ МТМТС 2015)». СПб., 2015. С. 143–147.

47. Топаж А.Г., Зайкин Д.А., Кондратенко А.А., Косоротов А.В., Крестьянцев А.Б., Таровик О.В. Исследование и оптимизация процессов снабжения шельфовых сооружений методами имитационного моделирования на примере анализа транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» // Труды четвертой Международной научно-практической конференции «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2017) // ISBN 978-5-902241-40-9 // АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», Санкт-Петербург, 2017. С. 153-157.

48. Выписка из Протокола №2 заседания научно-технического совета АО «ЦНИИМФ», 14.11.2019 г.

49. Предпроектная документация. Выбор и обоснование оптимальной логистической схемы доставки СПГ на Объект//18-19-1/51.01.14.4.24-19-1-ОИ.2. АО «ЦНИИМФ», СПб., 2019. – 153 с.]

50. Marine modeling and analysis branch. NOAA NWS NCEP environmental modeling center: <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/implementations.php>

51. Neftegaz.ru – деловой журнал [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <https://neftegaz.ru/news/transport-and-storage/537825-novatek-poluchil-uchastok-v-murmanskoy-oblasti-dlya-stroitelstva-peregruzochного-spg-terminala/>

52. Газета Коммерсантъ – официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3944739>

53. Данные АО «ЦНИИМФ». Официальный сайт: <http://cniimf.ru/>

54. Исследовательская система островов Тихого океана/Университет Гавайи [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: https://pae-paha.pacioos.hawaii.edu/erddap/griddap/ncep_global.html

55. Исследовательская система островов Тихого океана/Университет Гавайи [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: https://pae-paha.pacioos.hawaii.edu/erddap/griddap/ww3_global.html

56. Концепция развития инфраструктуры Северного морского пути: официальный сайт ООО «Морстройтехнология» [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <https://morproekt.ru/projects/435-kontseptsiya-razvitiya-infrastruktury-severnogo-morskogo-puti>

57. ООО «Газпром СПГ Портовая» - официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <https://gazpromspg.ru/>

58. ПАО «Газпром» - официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <https://www.gazprom.ru/press/news/2018/october/article462105/>

59. ПАО «Новатэк» - официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <http://www.novatek.ru/ru/business/criogas/>